

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему «Автоматизована система керування самохідним георадаром»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ІА-62

Князева Анжеліка Олександрівна _____

Керівник:

Доцент кафедри АУТС, к.т.н., доцент

Репнікова Наталія Борисівна _____

Рецензент

Доцент кафедри АСОіУ, к.т.н., доцент

Жданова Олена Григорівна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студентці
Князєвій Анжеліці Олександрівні

1. Тема проєкту «Автоматизована система керування самохідним георадаром», керівник проєкту Репнікова Наталія Борисівна к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «07» травня 2020р. №1081-с

2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2020

3. Вихідні дані до проєкту: швидкість руху самохідного георадару близько 4 км/год, маса георадара 10 кг, маса акумулятора 5кг, маса електродвигуна 5 кг, глибина досліджень георадаром від 1-150м, нульова установлена похибка цифрової системи, перерегулювання до 10%, час перехідного процесу близько 4 с.

4. Зміст пояснювальної записки: огляд предметної області та існуючих рішень. Опис структурної та функціональної схеми автоматизованої системи керування самохідним георадаром. Розробка математичної моделі цифрової системи керування самохідним георадаром. Аналіз якості отриманої системи. Синтез цифрового регулятора. Дослідження на грубість отриманих у результаті синтезу регуляторів. Реалізація методом безпосередньої декомпозиції обраного регулятора.

5. Перелік графічного матеріалу: схема моделей MATLAB/Simulink, схема електрична структурна, схема електрична функціональна, схема результатів дослідження регуляторів на грубість.

6. Дата видачі завдання 05.03.2020.

Календарний план

№	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз предметної області	10.03.2020	
2	Аналіз існуючих рішень	21.03.2020	
3	Розробка та опис структурної та функціональної схеми автоматизованої системи керування самохідним георадаром	30.03.2020	
4	Розробка математичної моделі цифрової системи	5.04.2020	
5	Аналіз стійкості та якості системи	17.04.2020	
6	Синтез регуляторів	23.04.2020	
7	Реалізація регулятора	6.05.2020	
8	Оформлення проєкту	20.05.2020	
9	Подання готового проєкту	09.06.2020	

Студентка

Анжеліка КНЯЗЄВА

Керівник

Наталія РЕПНІКОВА

АНОТАЦІЯ

Князева А.О. Автоматизована система керування самохідним георадаром. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.

Проект містить 67 с. тексту, 21 рисунок, 2 таблиці, посилання на 14 літературні джерела та 4 конструкторських документи.

Ключові слова: георадар, самохідний георадар, електродвигун, регулятор, цифрова система.

Об'єктом керування є електродвигун.

Предметом дослідження є автоматизована система керування самохідним георадаром .

Метою дипломного проекту є розвиток функціональних можливостей георадарного комплексу.

У дипломному проекті розроблено автоматизовану систему керування самохідним георадаром, яка забезпечила автоматичне позиціонування георадарного комплексу у зоні проведення досліджень. Розроблено математичну модель та цифрову передавальну функцію системи. Проведено аналіз якості та стійкості системи. Виконано синтез регулятора за методом бажаних передавальних функцій та ПД-регулятора. Проведене дослідження грубості розроблених регуляторів. Виконано реалізацію цифрового регулятора методом безпосередньої декомпозиції.

Отримані результати можуть використовуватись у навчальних цілях та наукових дослідженнях аналізу під поверхні за допомогою самохідного георадара.

ABSTRACT

Knyazeva A.O. Automated self-propelled georadar control system. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2020

The project contains 67 pages of text, 21 figures, 2 tables, references to 14 literature sources and 4 design documents.

Key words: georadar, self-propelled georadar, electric motor, regulator, digital system.

The object of control is an electric motor.

The subject of this research is an automated control system for self-propelled georadar.

The purpose of the diploma project is to develop the functionality of the georadar complex.

The diploma project is developed an automated control system for self-propelled georadar, which provided automatic positioning of the georadar complex in the research area. A mathematical model and digital transfer function of the system have been developed. The analysis of quality and stability of the system is carried out. The synthesis of the controller by the method of the desired transfer functions and the PID controller is made. Study of the roughness of the developed regulators. The controller is based on the selection of the desired transfer functions implemented by the method of direct decomposition.

The obtained results can be used for educational purposes and research of analysis under the surface using self-propelled georada

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система керування
самохідним георадаром»

Київ - 2020

ЗМІСТ

	Лист
ВСТУП	3
1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	5
1.1 Георадар.....	5
1.2 Призначення та застосування георадара.....	5
1.2.1 Застосування георадара у будівництві	6
1.2.2 Застосування георадара у геології та гідрогеології	6
1.2.3 Застосування георадара у дослідженні комунікацій.....	7
1.2.4 Застосування георадара у проектуванні транспортних шляхів..	8
1.3 Переваги та недоліки використання георадарів	9
1.4 Конструкція георадара	11
1.5 Принцип дії георадара.....	12
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	14
2.1 Види георадарів	14
2.2 Георадар ОКО-3 з антенним блоком АБ-150МЗ	16
2.3 РД-400 - радар-детектор.....	17
2.4 Виявляч підповерхневих аномалій "NR-1700G"	19
3 ОПИС СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	21
3.1 Опис структурної схеми.....	21
3.2 Опис Функціональної схеми.....	23
4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	26
4.1 Розрахунок необхідних характеристик для електродвигуна	26
4.2 Електродвигун.....	27
4.3. Розрахунок передавальної функції електродвигуна	30
4.4 Математична модель	35

					IA62.090BAK.005.ПЗ			
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.	Князева				Автоматизована система керування самохідним георадаром Пояснювальна записка	Лит.	Лист	Листів
Перевір	Репнікова						2	67
Н. контр.						НТУУ КПІ ФІОТ Група ІА-62		
Утв.								

5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ	37
5.1 Z-перетворення	37
5.2 Дослідження стійкості за загальним критерієм.....	39
5.3 Стійкість системи за критерієм Гурвіца.....	43
5.4 Стійкість системи за критерієм Найквіста.....	45
6 АНАЛІЗ ЯКОСТІ СИСТЕМИ	46
6.1 Показники якості цифрової системи	49
7 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ	50
7.1 Регулятор, заснований на виборі бажаних передавальних функцій . замкненої системи	50
7.2 ПД-регулятор	55
7.3 Дослідження регуляторів на грубість.....	57
7.4 Безпосередня декомпозиція	63
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66

ВСТУП

Розвиток георадара зробив великий прорив для людства у багатьох сферах. На сьогодні він надає дослідникам необхідну інформацію, яка стане при нагоді: під час проектування транспортно-магістральних шляхів та житлових комунікацій, будівництві та реконструкції, археологам під час пошуків важливих здобутків історії, навіть рятувальникам, наприклад, під час визначення місця знаходження вибухівки. Усі ці види робіт є важкими та інколи дуже небезпечними, тому необхідним було винайти точний та найменш руйнівний метод дослідження під поверхнями. Саме цей метод було створено у 1990-х роках, а задля його реалізації й по сьогодні використовується незамінний геофізичний прилад — георадар.

Буквально за декілька годин георадарне дослідження, яке використовує неруйнівний метод аналізу під поверхні, надасть інформацію про ділянку для забудови чи проектування автомагістралі. Георадар дозволяє дізнатися усі секрети під поверхнею та майже одразу побачити їх на екрані, але досі він робить свої вимірювання за допомогою людини, яка рухає прилад вздовж досліджуваної поверхні.

Тому розроблення систем керування такими приладами тема актуальна та своєчасно.

Метою дипломного проєкту є розвиток функціональних можливостей георадарного комплексу.

Об'єктом досліджень дипломного проєкту є самохідний георадар.

Предметом дослідження є автоматизована система керування самохідним георадаром.

У процесі виконання даної роботи необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробка структурної схеми системи керування;
- розробка функціональної схеми системи керування;

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						3
Зм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата		

- побудова математичної моделі електродвигуна для роботи самохідного георадара;

- дослідження якості та стійкості розробленої системи;

- синтез цифрового регулятора;

Для розв'язання поставлених задач в роботі застосовуються такі методи:

- фізико-математичне визначення необхідних характеристик електродвигуна за для забезпечення самохідності георадара;

- побудова математичної моделі електродвигуна;

- аналітично розраховані аналіз стійкості та якості системи, побудовані в MATLAB;

- побудова часових та частотних характеристик в MATLAB;

- аналіз точності системи;

- аналітично визначені та побудовані за допомогою MATLAB два регулятори: за бажаною передавальною функцією та ПІД-регулятор;

- дослідження грубості ПІД-регулятора та регулятора за бажаною передавальною функцією;

Отримані результати в ході виконання бакалаврської роботи використовувати в навчальних цілях та наукових дослідженнях аналізу під поверхні за допомогою самохідного георадара.

1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

У цьому розділі дипломного проєкту розглянуто предметну область георадара, а саме надано: його визначення, сфери застосування, переваги та недоліки його використання, конструкцію та принцип дії.

1.1 Георадар

Георадар — це пристрій радіолокаційного зондування для підповерхневих досліджень, спрямованих на отримання детальної інформації про об'єкт, у реальному режимі часу. Сучасний геофізичний прилад, що дозволяє дистанційно, на глибині від декількох сантиметрів до сотень метрів, виявляти під землею, або іншою поверхнею, металеві та неметалеві комунікації, артефакти, руїни древніх міст й інші об'єкти.

Унікальність цього приладу, серед інших що використовуються у геофізиці, полягає у високій мобільності в поєднанні з проведенням детального та неруйнівного дослідження поверхонь (без контрольного буріння). Завдяки даним отриманим у результаті георадарного дослідження, з'являється можливість прийняти правильне рішення при проектуванні та проведенні різних видів робіт.

1.2 Призначення та застосування георадара

Універсальність георадара дозволяє використовувати його не тільки безпосередньо у геофізиці, а й у багатьох інших сферах важливих для людства. Він призначений для вирішення широкого спектра задач в геології, гідрогеології, будівництві, екології, археології, при побудові та реконструкції житлових комунікацій та споруд, також є незамінним при пошуково-рятувальних

					1A62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

операціях. Іншими словами всюди, де потрібно здійснити ефективний пошук прихованих об'єктів.

1.2.1 Застосування георадара у будівництві.

Георадар у будівництві знайшов дуже широке призначення, на усіх його етапах.

На підготовчому етапі — це зондування з метою вивчення вологості, складу та стану ґрунту під забудову, виявлення прихованих підвалів та порожнин на місцях майбутнього будівництва. Визначаються геометричні та фізичні параметри підземних частин під фундамент будівель та споруд.

Під час самого будівництва, георадар, який використовує неруйнівний метод підповерхневого зондування є незамінним приладом для обстеження внутрішнього стану залізобетону. Також георадар використовується в будівництві для контролю якості й виявлення об'єктів в конструкціях перед свердлінням або бурінням.[1]

Особливо георадар потрібен під час дослідження старих будівель та споруд, аварійних приміщень, мостів та дамб. Для аналізу та визначення якості й стану бетонних конструкцій, проблемних місць та подальшого їх усунення. Георадар сканує внутрішню будову і визначає наявність деформацій, руйнувань (наприклад: тріщин, пустот) та стан будівель й інженерних конструкцій.

1.2.2 Застосування георадара у геології та гідрогеології

Найбільшим попитом георадар користується у таких природничих науках як екологія, геологія та гідрогеологія. Завдяки йому, на сьогодні можливо зробити повне та детальне дослідження ґрунту та будь-якої іншої природничої поверхні. Наприклад, пісок, глина, кам'яниста поверхня, лід, сніг та інші.

					IA62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						6
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

Георадар під час досліджень у геології може надати інженеру такі данні, як: побудову геологічних розрізів (георадіолокаційний профіль), картографування меж поширення корисних копалин у результаті витоку, чи з метою видобутку, положення карстових воронок і порожнин, забезпечує чітке визначення кордонів між різними породами й мінералами та інше. А найголовніше, що весь цей перелік він надає не пошкоджуючи досліджувану ділянку, а глибина дослідження при цьому сягає близько 50 метрів.

У гідрогеології також існує багато завдань, для вирішення яких застосовують георадар. Наприклад, визначення товщини льоду, глибини й профілю дна річок і озер.

1.2.3 Застосування георадара у дослідженні комунікацій

На сьогодні, виявлення прихованих комунікацій (кабелів, трубопроводів, колекторів, баків, резервуарів, септиків і т.д.) у міських умовах георадаром набуває більшої популярності. Пояснюється це тим, що наявні плани комунікацій мають значні розбіжності з дійсністю, а іноді просто відсутні. Тому, працювати, без попереднього георадарного обстеження, на території імовірно розміщених комунікацій, не бажано.

Дані отримані за допомогою георадара допомагають, комунальним та ремонтним службам, дізнатися про наявність, місце розташування, глибину залягання й стан підземних комунікацій на осях горизонтального буріння. Забезпечують безаварійну роботу, виконану в найкоротші терміни із мінімальними витратами. Також, георадар потрібен при обстеженні ділянок місцевості, перед проведенням земляних робіт й для виявлення місць проривів в трубопроводах. Використання георадара дозволяє вести успішний пошук місць витоку рідини з підземних і прихованих у стінах трубопроводів. На відміну від металошукачів й трасошукачів, георадар може здійснювати пошук, навіть складних для виявлення, пластикових, бетонних та інших неметалевих труб.

					1A62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.4 Застосування георадара у проектуванні транспортних шляхів

При проектуванні, прокладенні та ремонті транспортно-магістральних шляхів, також, не обійтись без застосування георадара. Для якісного проведення ремонтних робіт, як правило, потрібно попереднє обстеження ділянки. Зазвичай, це контрольне буріння, відбір проб ґрунту і статичні навантаження. Але всі ці методики достатньо дорогі, а найголовніше, не надають цілісної картини стану дорожнього покриття та стану ґрунтів під ним. Навіть саме по собі застосування цих методів послаблює дорожнє покриття. Тому в умовах, коли кошти що виділяються на оцінку стану дорожнього покриття обмежені в розмірах, на перше місце виходить економічність методик діагностування. У зв'язку з цим, особливої актуальності і раціональності набуває георадарне обстеження.

За характеристиками отриманими з георадіолокаційного профілю (розрізу дорожнього пирога), оператор георадара робить висновки: про товщину шарів різної щільності, наявність у них порожнеч, перезволоження, тобто про наявний стан усього дорожнього покриття. У процесі інтерпретації георадіолокаційних профілів можна виявляти наявність, а також спрогнозувати виникнення й поширення небезпечних фізико-хімічних процесів (суффозии, карсти), зон просадок, зон розмиття ґрунтів та інше. [1]

Провали на автодорогах можуть призводити до серйозних аварій, тому однією з головних потреб, задля вирішення якої застосовують георадар, є детальне обстеження наявних автомобільних доріг, що дозволяє на основі отриманих даних прийняти рішення про вибір ефективних видів ремонтних робіт.

Завдяки комплексній георадарній експертизі автомобільних і залізних доріг можливо швидко, економічно і надійно отримувати найточніші дані про стан дорожнього покриття, кількість і якість використаних матеріалів, прогнозувати місця руйнувань і багато іншого.

					IA62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						8
Зм.	Лист	№ докцм.	Підпис	Дата		

1.3. Переваги та недоліки використання георадарів

Переваг у георадарів багато. Вони забезпечують широкі можливості по визначенню місця знаходження підземних комунікацій на відміну від електромагнітних методів розвідки. Вони здатні виявляти труби та інші інженерні комунікації з будь-яких матеріалів, які складно або навіть неможливо знайти іншими способами, виявляють майже будь-який твердий предмет, що відрізняється по щільності від навколишнього ґрунту, і навіть обриси засипаної траншеї, в якій укладена труба, також будуть видні на екрані георадара.[2]

Основні переваги георадара над іншими методами дослідження поверхонь:

1) при проведенні дослідження не потрібні великі площі. Через те, що увесь комплекс обладнання має невеликі розміри. Це суттєва перевага, що дозволяє робити дослідження навіть на не пристосованих для цього територіях, такі як підвали чи обмежені ділянки;

2) не завдає шкоди навколишньому середовищу. Виключає порушення екологічного балансу та не пошкоджує досліджувану ділянку;

3) використання георадара не вимагає додаткового обладнання і дуже потужних джерел енергії;

4) однаково ефективний при дослідженні вертикальних, похилих і горизонтальних поверхонь;

5) для детального дослідження достатньо надати доступ хоча б з однієї сторони конструкції;

6) проводить вимірювання практично на будь-якому ландшафті, та на будь-якій поверхні: земля, пісок, глина, камінь, сніг, лід та інші;

7) використовується також на будь-яких штучних поверхнях — залізобетон, бетон, цегла і так далі;

8) георадар має високу роздільну здатність й високу стійкість до викривляючих сигналів;

					IA62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						9
Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата		

9) застосування георадіолокаційного методу діагностики, який використовується у георадарі є на даний час найперспективнішим для точного визначення характеристик досліджуваного об'єкта. У порівнянні з іншими методами, характеризується високою швидкістю поряд з низькою енергозатратністю;

10) застосування даного методу діагностики істотно скорочує витрати на проведення бурових робіт. Адже георадар надає досліднику детальну інформацію про шари ґрунту та його структуру. Буріння свердловин в цьому випадку проводиться в меншій кількості і саме там, де це дійсно потрібно. А значить і економічна ефективність проєкту з використанням георадара значно вище. [1]

Недоліки:

1) не працює в щільних ґрунтах. Це обмежує можливість їх використання для визначення місця розташування підземних комунікацій. Наприклад, георадари не можуть виявити керамічні труби в глинистих ґрунтах, тому що кордони між керамікою і глиною прилад не “побачить”, досить важко розрізнити пластикові труби з водою в щільному ґрунті — вологій глині і землі;

2) скельні та різномірні осадові породи розсіюють його сигнал більше ніж інші;

3) можуть виникнути складності при визначенні підземних кабелів, що знаходяться всередині оболонки великого діаметра;

4) вимагає більше часу для обробки даних в порівнянні з простою технікою магніторозвідки;

5) відносно високе споживання енергії незручно для польових робіт;

6) вартість георадара часто значно вища, ніж в інших приладах магніторозвідки;

					IA62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						10
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

1.4. Конструкція георадара

Найпростіша конструкція георадара складається з трьох основних блоків: антенного блоку, блоку реєстрації та блоку управління.

Антенний блок складається з двох антен: передавальної та приймальної, які слугують для передачі заданого імпульсу й отримання відбитого імпульсу від поверхні об'єкта на досліджуваній ділянці. Іноді конструкція георадара може мати декілька антенних блоків, які мають різні частоти зондувальних імпульсів. Вибір антенних блоків обумовлюється завданням георадарного обстеження.

Найважливіші характеристики апаратури, для виконання будь-якого завдання георадара — це роздільна здатність і глибинність. Роздільна здатність — це здатність виявляти певного розміру об'єкт на певній глибині. Глибинність і роздільна здатність пов'язані зворотною залежністю: чим більше глибина, тим нижче роздільна здатність, тобто тим більшого розміру об'єкт може бути виявлений, а більш дрібні об'єкти губляться. Наприклад, для вимірювання товщини конструктивних шарів дорожнього одягу використовуються високочастотні антенні блоки з частотою 900 - 1700 МГц, що мають глибинність менше ніж два метра, але високу роздільну здатність. Навпаки, для оцінки потужності родовища кварцового піску високий дозвіл не вимагається, проте потрібна максимальна глибинність. У цьому випадку застосовуються низькочастотні антенні блоки, налаштовані на центральну частоту зондувального імпульсу 25- 150 МГц.[3]

Також до антенного блоку належать колесо вимірювання та GPS модуль. Вимірювальне колесо (одометр) призначене для визначення пройденого шляху в процесі отримання георадарного профілю. Одометр кріпиться до корпусу антенного блоку і підключається до спеціального роз'єму.[4]

До блоку управління належать система кабелів та перетворювачів: АЦП (аналого-цифровий перетворювач) та ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач).

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок реєстрації складається з комп'ютера оператора (ноутбука), або іншого записувального пристрою.

З'єднання між блоками відбувається за допомогою Wi-Fi або USB.

1.5 Принцип дії георадара

Принцип дії георадара цілком і повністю ґрунтується на використанні класичного методу радіолокації: випромінювання і фіксація відбитих електромагнітних імпульсів. Найкоротший електромагнітний імпульс (одиниці й долі наносекунд) проводиться самим приладом і за допомогою випромінювача (передавальної антени) направляється в досліджувану середу. Вибір тривалості імпульсу визначається виходячи з потрібної глибини зондування і роздільної здатності георадара.

Досліджуваним середовищем може бути будь-який матеріал: бетон, ґрунт, цегла, вода, пісок, лід, сніг та ін. Середовище може мати неоднорідну структуру, що і показує прилад. На підставі таких досліджень виявляються різні порожнечі й вкраплення інших матеріалів.[1]

Як правило, при георадіолокаційному дослідженні блок антен георадара переміщується по поверхні середовища. Випромінювання і приймання відбитих середовищем сигналів відбувається через певну відстань. Ця дистанція має назву «крок зондування». Мінімальне значення кроку може вимірюватися лише кількома міліметрами. Випромінюваний в досліджувану середу імпульс відбивається від предметів або неоднорідностей середовища, що мають відмінну від середовища діелектричну проникність або провідність, приймається приймальною антеною, посилюється в широкосмуговому підсилювачі, перетворюється в цифровий вигляд за допомогою аналого-цифрового перетворювача і надходить на пристрій реєстрації інформації.

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						12
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

Після аналізу записаної інформації і її структурування інженер-діагност, що проводить георадіолокаційну експертизу, отримує «розріз досліджуваного середовища». Інша назва цього розрізу — георадіолокаційний профіль.

Найчастіше такого роду профіль виконаний у вигляді радіограми. Радіограма являє собою масив глибин відбитих сигналів. Ще одна назва радіограми — хвильова картина. [1]

У цьому розділі дипломного проєкту було сформовано та описано детальне визначення георадару, принцип дії та конструкцію. Надано увесь перелік задач, які розв’язуються за допомогою георадарного комплексу, у таких сферах як будівництво, геологія, гідрогеологія, транспортно-магістральне проєктування й інші. Також, георадар є незамінним:

- під час пошуку підземних споруд, тунелів;
- при огляді місцевості під час саперних і пошуково-рятувальних роботах та археологічних дослідженнях;
- при виявленні місць побутових відходів; під час пошук скарбів;

Універсальність, мобільність, точність проведених досліджень, великий спектр вирішуваних ним завдань та помірна вартість роблять його необхідним для використання та вдосконалення.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Сучасний ринок радіолокаційної техніки може запропонувати широкий вибір георадарів, під майже будь-які потреби користувача. Їх виробництвом займаються більше ніж 8 країн світу: США, Росія, Японія, Великобританія, Україна, Канада, Швеція та інші.[5] Усі ці країни надають якісні та точні технічні характеристики своїм геофізичним приладам, але найважливішою складовою георадара є — антени. Вони обираються залежно від цілей радіолокаційного зондування і є основною відмінністю при виборі георадарного комплексу. Виробники на сьогодні пропонують георадарні антени з будь-якими частотами, деякі навіть продають свої прилади з цілим комплектом змінних антен, що робить даний георадарний комплекс універсальним для багатьох видів досліджень. Єдина функція, яку ще не пропонують у великому обсязі — це самохідність.

2.1 Види георадарів

Не дивлячись на дуже великий вибір георадарів на ринку, саме класифікацій георадара існує всього дві: залежність від можливості використання одного або декількох каналів і в залежності від потужності сигналу.

За кількістю використання каналів георадари поділяються на такі групи[6]:

- Одноканальні радари. Георадар оснащується тільки однією приймальною антеною й однією передавальною антеною. Не є універсальним для досліджень. Кожен георадар такого виду обирається час іншого дослідження, якщо його мета та вхідні дані не збігаються з попереднім;

- Багатоканальні парні радари. До складу георадарного комплексу даного типу входить кілька приймальних й передавальних антен, так що зйомка геопрофілю з кожного каналу відбувається одночасно. Це робить георадар

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						14
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

універсальним для вирішення декількох завдань. Поширені у багатьох зарубіжних виробників, які спеціалізуються на геопрофілюванні дорожніх покриттів. Така система фактично містить кілька одноканальних георадарів і дозволяє в рази зменшити час профілювання. Недоліком таких систем є громіздкість (вони у рази більше одноканальних) і висока вартість.

- Багатоканальні георадари з синтезованою апертурою. Це найбільш складний тип георадарів, в якому на одну передавальну антену доводиться кілька приймальних, які синхронізовані між собою. Основною перевагою таких систем є більш чітке позиціонування об'єктів під землею - фактично вони працюють за принципом стерео зору, як якщо б у радара було б кілька очей-антен. Головним недоліком таких систем є дуже складні обчислювальні алгоритми, які необхідно вирішувати в реальному часі, що призводить до використання дорогих електронних компонентів. У той же час, такі системи більш стійкі і дозволяють отримувати найбільш точну картину розподілу діелектричної проникності під землею[7].

За потужністю сигналу георадари поділяються на такі види:

- Стробоскопічні. Георадари даного виду випускають імпульси з переважно невеликою енергією, близько 0.1-1 мкДж, але таких імпульсів випускається досить багато, близько 40-200 тисяч імпульсів в секунду. Використовуючи стробоскопічний ефект можна отримати дуже точну радіограму в часі. Водночас, потужність в 0.1-1 мкДж накладає серйозні обмеження на глибину проникнення таких імпульсів. Зазвичай такі радари використовують для глибин зондування до 10 метрів. Однак, в окремих чітко під потреби георадарного завдання й не може бути використаним під випадках «пробивна» здатність досягає понад 20 метрів. Досить слабкі, але водночас цей вид нараховує досить недорогі моделі які є більш доступними для дослідників;

- Слабко імпульсні. Найбільш розповсюджений тип георадарів. Такі георадари випускають істотно менше імпульсів, ніж стробоскопічні, приблизно 500-1000 в секунду, потужність кожного такого імпульсу вже істотно вище і

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						15
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

досягає 100мкДж. Такий апарат дозволяє знімати близько однієї радіограму в секунду і практично не дозволяє використовувати усереднення для поліпшення відносини сигнал/шум. Це дозволяє отримувати радіограми з глибин в десятки метрів, але трактувати такі радіограми може тільки спеціально навчений фахівець.[7] ;

- Зверх потужні. Це складні прилади, оснащені рознесеними антенами Такі георадари випускають тільки кілька імпульсів в секунду, але енергія імпульсу досягає 1-12 Дж. Це дозволяє значно поліпшити ставлення сигнал/шум і динамічний діапазон георадара і отримувати відображення від багатьох глибинних шарів або працювати на важких і вологих ґрунтах. Для обробки радіограми потрібне спеціальне програмне забезпечення, яке виробники таких георадарів поставляють у комплекті.

2.2 Георадар ОКО-3 з антенним блоком АБ-150М3

Георадар ОКО-3 з антенним блоком АБ-150М3 призначений для пошуку підземних ходів, сховищ, пустот, великих металевих і неметалевих об'єктів, в тому числі вибухових пристроїв, бомб, снарядів і т.д.[8]

З огляду на технічні характеристики георадару ОКО-3 з антенним блоком АБ-150М3, які наведені у Таблиці 1 цей георадар є одноканальним та слабо імпульсним, тобто відноситься до більш простих видів георадарів й не пристосован для виконання багатьох георадарних завдань, а може застосовуватись лише для пошуку пустот глибина яких становить не більше 12ти метрів. .

					1А62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						16
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

Таблиця 1 - Технічні характеристики георадара ОКО-3

Найменування параметру, одиниця виміру параметра	Значення
Максимальна глибина виявлення, м (значення дано для легких сухих ґрунтів)	12.0
Центральна частота антенного блоку, МГц	150
Швидкість сканування, трас / сек (при розгортці 512 точок в трасі)	400
Вбудований WiFi	Має
Можливість підключення GPS	Має
Діапазон робочих температур, ° С	От -20 до +50
Габарити антенного блоку, см (довжина x ширина x висота)	85x65x18
Маса антенного блоку, кг	16.2

2.3 РД-400 - радар-детектор

Георадар застосовується не тільки для різного роду проєктувань та реконструкцій, а й для таких важливих завдань, як пошук людей. Ось Радар-детектор РД-400 являє собою портативний спеціалізований радіолокатор (георадар) і призначений саме для оперативного пошуку і виявлення по диханню живих об'єктів, що опинилися під завалами в результаті техногенних катастроф, сходів снігових лавин тощо[9].

Під час дослідження цим георадаром, криптограма із зображенням людини з'являється на екрані монітора. Форма спектра відбитого сигналу розширює можливості оператора по прогнозуванню і оцінки ситуації про можливу наявність під завалом об'єкта, що дихає. Поява яскраво вираженого піка в спектрі

говорить про виявлення об'єкта по диханню. Для підвищення ефективності застосування радара-детектора, програмою РД-400 передбачений ряд опцій, призначення і застосування яких, описано нижче:

- опція «Налаштування» - дозволяє вибрати мову, на якій виконані написи в головному меню програми РД-400.

- опція «Дистанція» - призначена для вибору дистанції зондування радара детектора РД-400 (3 м, 7 м, 15 м, 30 м).

- опція «Час аналізу» - призначена для установки часу, в перебігу якого програма аналізує спектр відбитих сигналів. Діапазон зміни часу аналізу 15, 30, 60, 120 сек. При проведенні пошукових робіт у важких умовах необхідно збільшувати час аналізу до 60-120 сек.

- опція «Сліпа зона» - призначена для регулювання величини дистанції в ближній зоні приладу з метою зменшення ймовірності появи помилкових виявлень. Величина «Сліпий зони» змінюється до дистанції 1,0 м з кроком 10 см, далі зміна відбувається через 0,5 м.

- опція «Чутливість» - призначена для зміни чутливості приладу при виявленні об'єктів по диханню в залежності від складності зондувального середовища, має 8 ступенів градації, 8 - найвища чутливість.

- опція «Середовище» - вибирається залежно від характеру середовища через яку ведеться зондування (бетон, повітря, сніг). Вибір середовища впливає на правильність визначення дистанції від радара-детектора до виявленого по диханню об'єкта.

Радар-детектор РД-400 виявляє об'єкти не тільки по диханню, але і по руху. У першому випадку виявлення рухомого об'єкта відображається у вигляді криптограми - силует крокуючої людини, яка переміщається на екрані монітора. У другому випадку додається радарограма, на якій червоним маркером промальовується траєкторія руху виявленого об'єкту щодо приладу[9].

2.4 Виявляч підповерхневих аномалій "NR-1700G"

NR-1700G невеликий портативний георадар. Призначений для пошуку і виявлення неоднорідностей, аномалій та об'єктів прихованих у суцільних середовищах (дерево, цегла, залізобетон, будівельні конструкції, ґрунт і т.п.). Наприклад, NR-1700G застосовується під час пошуків прихованої проводки, трубопроводів і кабельних ліній або вентиляційних і комунікаційних каналів[10].

Отримана за допомогою приладу інформація про внутрішню структуру обстежуваних об'єктів відображається в режимі реального часу на кольоровому ПК-дисплеї.

Прилад відрізняється простотою експлуатації, портативністю, економічністю і забезпечує рішення широкого кола пошукових завдань. Технічні характеристики виявляча підповерхневих аномалій "NR-1700G".

Таблиця 2 - Технічні характеристики NR-1700G

Найменування параметру, одиниця виміру параметра	Значення
Глибина зондування, м	1.0
Роздільна здатність, см	0.5-3
Швидкість зондування, м/сек	до 1
Центральна частота МГц	1700
Вага у робочому положенні, кг	1.7
Діапазон робочих температур, ° С	От -20 до +50
Час безперервної автономної роботи	От -20 до +50

Усі наведені приклади існуючих георадарів мають свої переваги та недоліки, застосовуються для різних цілей, але на жаль жоден з них не працюватиме без прямої участі людини у дослідженні, що суперечить сучасним

тенденціям людства. З кожним днем все більше й більшелюдської праці замінюється автоматизованими системами. Тому й завданням даної дипломної роботи було обрано автоматизувати роботу георадара, тобто зробити його самохідним. На сьогодні, в жодному публічному джерелі, не було знайдено інформації щодо реального існування самохідного георадара. Далі у роботі буде підібрано дійсний електродвигун для надання георадару самохідності.

					IA62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						20
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ОПИС СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

Кожна система повинна мати свою структуру й певні функції, які вона виконує. Структура й функціонал для автоматичної системи керування самохідним георадаром було реалізовано відповідно у структурній й функціональній схемах.

3.1 Опис структурної схеми

Структурна схема - це схема, яка визначає основні функціональні частини (блоки) системи, їх призначення і взаємозв'язки між ними. Розробляється на початкових стадіях проектування і передуює розробці схем інших типів.

Побудова схеми має давати наочне уявлення про: склад системи, послідовність взаємодії функціональних частин у системі.

Структурна схема автоматизованої системи керування самохідним георадаром, яка подана у додатку А, показує структуру, основні блоки й взаємозв'язки автоматизованої системи керування самохідним георадаром й складається з наступних основних блоків:

- персональний комп'ютер оператора — забезпечує коректне відображення даних досліджень георадарного комплексу, дозволяє аналізувати та обробляти отримані дані;

- канал передачі даних — канал за допомогою якого відбувається передача даних, отриманих під час дослідження георадаром на персональний комп'ютер оператора, й навпаки. Дані які мають бути надані георадару та блоку руху георадара, від персонального комп'ютера, також надаються за допомогою цього каналу;

- джерело живлення — джерело, яке надає електричну енергію двигуну та георадарному блоку. У випадку даної системи джерелом живлення виступає - акумулятор;

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						21
Зм.	Лист	№ докцм.	Підпис	Дата		

- блок руху георадара — це комплекс деталей, які відповідають за рух самохідного георадарного комплексу;

- георадар — це увесь георадарний комплекс, якій здійснює георадарне дослідження.

Основний блок, який називається “Блок руху георадара” має такі блоки у своєму складі:

- мікроконтролер — пристрій, який контролює та допомагає підтримувати необхідну швидкість руху конструкції;

- датчик швидкості — даний датчик знімає показники швидкості з ходової частини блока руху георадара та передає отримані дані на мікроконтролер;

- блок узгодження — слугує проміжним блоком між мікроконтролером та електродвигуном та порівнює задану швидкість з отриманою від датчика швидкості через мікроконтролер.

- електродвигун — основний блок у георадарному русі. Електрична машина, яка перетворює електричну енергію у механічну й тим самим створює рух георадарного комплексу;

- ходова частина — це частина, яка утворилась після перетворення електродвигуном електричної енергії у механічну й відповідає за усю механічну частину системи.

Найголовніший блок усієї розробленої системи, під назвою “Георадар” має наступні складові, у своїй структурі:

- передавальну антену — одна з основних складових георадара. Антена яка забезпечує коректну передачу імпульсів у досліджувану середу. Також може мати різні частоти, від яких залежить глибинність та роздільна здатність усього георадарного дослідження;

- імпульси — дуже малі сигнали, які посиляє передавальна антена у досліджувану середу;

- відбиваючі хвилі — хвилі які відбиваються від предметів або від середовища з іншою діелектричною проникністю, після потрапляння імпульсів на них й передаються до приймальної антени;

- приймальна антена — також як й передавальна антена є однією з головних складових комплексу георадарного дослідження. Може мати різні частоти, так само як й передавальна антена, але її головна функція приймати відбиваючи хвилі.

Також на структурній схемі є “Блок датчиків вимірювання”. Він слугує для збору та наглядного подання даних про зроблене дослідження.

3.2 Опис функціональної схеми

Функціональна схема — це схема яка більш детально роз'яснює певні процеси, що відбуваються у певних функціональних частинах системи, на основі структурної схеми для кожного блоку.[11]

Функціональними схемами користуються для вивчення принципу роботи системи, а також при їх налагодженні, контролі чи ремонті. На такій схемі зображують всі функціональні частини виробу та основні зв'язки між ними.

Функціональна схема автоматизованої системи керування самохідним георадаром подана у додатку Б даної дипломної роботи.

Функціональна схема складається з наступних основних блоків:

- персональний комп'ютер оператора;
- канал передачі даних — це канал передачі даних від георадару до персонального комп'ютера й навпаки від персонального до ходової частини й георадарного блоку. У функціональній схемі даний канал складається з двох блоків: Wi-Fi й USB. Wi-Fi буде використовуватись, як основний канал передачі, але якщо будуть дуже великі перебої зв'язку, що часто можливо у польових умовах, то використовуватиметься запасний канал USB;
- джерело живлення;

- блок руху георадара — має ті ж самі складові частини, й їх принцип дії, який описано у підрозділі 3.1

- блок датчиків — це не від’ємна складова майже будь-якої системи, яка допомагає під час дослідження, визначити коректність даного дослідження, впевнитись, що усе працює вірно, чи знайти помилку під час роботи. Також датчики є не замінними під час роботи, тому що завдяки їм можливо контролювати й регулювати деякі параметри системи;

- георадар — геофізичний прилад структура й опис якого надано під час опису структурної схеми у розділі 3.1, але у функціональній схемі додалися перетворювачі сигналів, такі як: цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), аналого-цифровий перетворювач (АЦП) й оптоволоконний перетворювач. ЦАП використовується в даній функціональній схемі для перетворення цифрового сигналу отриманого від ПК оператора у аналоговий для подальшої роботи георадара, а АЦП використовується для перетворення вже аналогового сигналу у цифровий задля подальшого коректного відображення та обробки на ПК оператора. Оптоволоконні перетворювачі застосовуються для коректного перетворення сигналу від передавальної антени й перед приймальною антеною.

Детальніше розглянемо блок датчиків й датчики які входять до його складу, а саме:

- датчик швидкості — показує з якої швидкістю рухається георадарна конструкція;

- датчик заряду пристрою — датчик, який показує наскільки заряджене джерело живлення системи, а саме акумулятор.

- датчик геолокації (GPS) — так як розробляється самохідний георадар, його відстань від оператора може сягати десятки кілометрів, саме тому необхідно досить точно визначати його положення на карті місцевості. Для цього й потрібен датчик геолокації .

- датчик частоти радіохвиль — важливий датчик, який показує на яку частоту розраховані встановлені передавальна та приймальна антени. Від цього показнику залежить: глибинність та роздільна здатність георадарного дослідження.

- датчик глибини вимірювання — датчик, який показує на якій глибині проводяться дослідження. Його показники на пряму залежать від показників частоти встановлених антен.

- датчик вологості ґрунту — показує ступінь вологості досліджуваного ґрунту, що є дуже важливим показником при підготовці до будівництва споруд та доріг.

Отже, у ході даного розділу було розроблено й описано дві важливі для проєктування будь-якої системи схеми, а саме, структурна та функціональна. На основі отриманих схем можна чітко дізнатись, які ж саме функції саме виконувати автоматизована система керування самохідним георадаром, а також за допомогою стрілок які зв'язують блоки у схемах є можливість прослідкувати залежність цих функцій одна від одної. управління.

					IA62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						25
Зм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Розрахунок необхідних характеристик для електродвигуна

Для забезпечення безперервного руху георадарної конструкції та водночас точного і якісного вимірювання потрібно підібрати правильний електродвигун. А саме такий, який здатен забезпечувати необхідну потужність для підтримки швидкості георадару 4 км/год.

Задля того щоб підібрати необхідний електродвигун потрібно розрахувати деякі технічні характеристики, а саме: потужність та кутову швидкість обертання вала двигуна.

Формула розрахунку необхідної потужності системи:

$$N = mgV, \quad (4.1)$$

де m - маса усієї рухомої конструкції;

g - прискорення вільного падіння ($g = 9.8 \text{ м/с}^2$);

V - необхідна швидкість руху конструкції ($V = 4 \text{ км/год} = 1.111 \text{ м/с}$).

Розрахунок маси конструкції:

Георадар $\approx 10 \text{ кг}$

Акумулятор $\approx 5 \text{ кг}$

Двигун $\approx 5 \text{ кг}$

Інші деталі $\approx 5 \text{ кг}$

Сума усі складових маси конструкції:

$$m = 10 + 5 + 5 + 5 = 25 \quad (4.2)$$

					IA62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						26
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

Отже, приблизна маса всієї конструкції становить 25 кг.

Розраунок потужність за формулою (4.1):

$$N = 25 \times 9.8 \times 1.111 = 272.195 \text{ Вт} \quad (4.3)$$

З розрахунку (4.3) можна стверджувати, що необхідна потужність електродвигуна становить приблизно 300-400Вт.

Далі переходимо до розрахунку необхідної кутової швидкості обертання вала двигуна. Формула для розрахунку:

$$\omega = \frac{Vk}{0.0006\pi d}, \quad (4.4)$$

де V - швидкість руху конструкції ($V=4\text{км/год}$);

k - коефіцієнт пропорційності ($k=3.706$);

d - діаметр колеса, за допомогою яких пересувається конструкція ($d=20\text{см}$).

Робимо розрахунок кутової швидкості обертання вала за формулою (4.4):

$$\omega = \frac{4 \times 3.706}{0.0006 \times 3.14 \times 20} = \frac{14.824}{0.03768} = 393.41826 \text{ об/хв} \quad (4.5)$$

4.2 Електродвигун

Згідно з даними які були розраховані у попередньому підрозділі підібрано колекторний електродвигун постійного струму D24/450DC з редуктором. Він використовується у якості приводу електроквадроциклів для дітей та підлітків. Також може застосовуватися на іншому легкому електротранспорті, в різному устаткуванні, механізмах і пристосуваннях.

					IA62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						27
Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата		

Електродвигун 24В 450Вт з вбудованим односхідчастим циліндричним редуктором. Внаслідок чого, має невелику швидкість обертання вихідного валу і хорошу тягу щодо своєї потужності. [12]



Рисунок 4.1 - Електродвигун постійного струму 24v450w с редуктором.

Надійність електроприводу, де використовується пропонований електродвигун з редуктором і трансмісія з ланцюгом, — вище, ніж у електроприводів, що має у своєму складі двигун 24v500w без редуктора. Це пов'язано з тим, що в першому випадку, передача крутного моменту від двигуна, розподіляється на редуктор і ланцюг. В результаті, знос кожного елемента трансмісії зменшується, а ресурс електроприводу збільшується.

Електродвигун D24 / 450DC, якщо його не перевантажувати, — служить довго і безвідмовно. У двигуна — корпус з отворами для циркуляції повітря, але немає крильчатки для примусового охолодження якоря і статора. Пасивне охолодження, шляхом розсіювання тепла і природної циркуляції повітря усередині корпусу, не дозволяє довго розвивати високу потужність.

Якір двигуна обертається в опорних підшипниках. Редуктор, опорні підшипники, колекторний вузол і щітки — вельми довговічні. Щітки — не вимагають заміни, як мінімум, протягом декількох років постійної експлуатації.

Редуктор, підшипники і колектор, зазвичай служать набагато довше. Якщо двигун не перевантажувати, то ресурс його роботи може перевищувати 10 років.

Має наступні технічні характеристики[12]:

- номінальна напруга: 24v
- номінальна потужність: 450w
- максимальна потужність: 900w
- номінальний струм: 24A
- максимальний струм: 38A (короткочасно)
- максимальна швидкість обертання валу: 450 об/хв
- обертання вала в обидві сторони (при використанні контролера зі зміною напрямку обертання валу, або перемикача заднього ходу PR-2)
- максимальний ККД 82%
- охолодження повітряне, пасивне (розсіювання тепла корпусом)
- матеріал корпусу: сталь, легкі сплави.
- клас захисту: IP33
- шестерні в редукторі виготовлені з композитних матеріалів на основі високотемпературних зносостійких пластиків.
- розміри: 210 мм (довжина разом з валом); 133 мм (ширина корпусу разом з редуктором); 143 мм (висота)
- діаметр корпусу двигуна: 105 мм
- довжина валу: 34 мм
- діаметр вала: 20мм
- довжина кабелю в подвійній ізоляції: 60 см
- вага: 5.4 кг.

На основі цих технічних характеристик можемо розрахувати необхідну нам передавальну функцію, за допомогою якої будемо мати змогу побудувати математичну модель.

					1A62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						29
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

4.3. Розрахунок передавальної функції електродвигуна

Передавальна функція електродвигуна постійного струму незалежного збудження має вид:

$$W(s) = \frac{K_D}{T_E T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (4.6)$$

де K_D - коефіцієнт пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання;

T_E - електромагнітна постійна часу;

T_M - електромеханічна постійна часу.

Розрахунок коефіцієнта та постійних здійснюється за наступними формулами:

$$K_D = \frac{1}{C_B}, \quad (4.7)$$

$$T_E = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (4.8)$$

$$T_M = \frac{R_{\text{я}} I_{\text{п}}}{C_B C_M} \quad (4.9)$$

де C_B - коефіцієнт пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання;

$L_{\text{я}}$ - індуктивність обмотки якоря;

$R_{\text{я}}$ - опір якоря;

$I_{\text{п}}$ - момент інерції якоря;

C_M - коефіцієнт пропорційності;

Для розрахунку коефіцієнта пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання необхідно знайти C_B за формулою:

$$C_B = \frac{U_{НОМ} - I_{НОМ} R_{Я}}{\omega_{НОМ}}, \quad (4.10)$$

де, $U_{НОМ}$ - номінальна напруга електродвигуна;

$I_{НОМ}$ - номінальний струм електродвигуна;

$\omega_{НОМ}$ - номінальна кутова швидкість обертання вала двигуна.

Згідно технічних характеристик вибраного електродвигуна:

$$U_{НОМ} = 24\text{В};$$

$$I_{НОМ} = 24\text{А}.$$

Опір якоря ($R_{Я}$) та номінальна кутова швидкість обертання вала двигуна ($\omega_{НОМ}$) знаходимо за наступними формулами:

$$R_{Я} = 0,5 \times \left(1 - \frac{\eta_{НОМ}}{100} \right) \times \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}}, \quad (4.11)$$

$$\omega_{НОМ} = \frac{\pi \times n_{НОМ}}{30}, \quad (4.12)$$

де, $\eta_{НОМ}$ - номінальний коефіцієнт корисної дії ($\eta_{НОМ} = 82\%$);

$n_{НОМ}$ - номінальна частота обертання електродвигуна ($n_{НОМ} = 450$ об/хв).

Розрахунок формули (4.11) та (4.12):

$$R_{Я} = 0,5 \times \left(1 - \frac{82}{100} \right) \times \frac{24}{24} = 0,09\text{Ом}, \quad (4.13)$$

$$\omega_{НОМ} = \frac{3,14 \times 450}{30} = 47,1\text{рад/с} \quad (4.14)$$

Згідно отриманих розрахунків та даних з технічного паспорту електродвигуна розрахуємо формулу (4.10):

$$C_B = \frac{24 - 24 \times 0.09}{47.1} = \frac{21.84}{47.1} = 0.46369 \quad (4.15)$$

За формулою (4.7) знайдемо коефіцієнт пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання (K_D):

$$K_D = \frac{1}{0.46369} = 2.15661 \quad (4.16)$$

Отже, коефіцієнт пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання (K_D) для передавальної функції електродвигуна дорівнює 2.15661.

Робимо розрахунок постійних часу. Знайдемо електромагнітну постійну часу (T_E) за формулою (4.8). Для розрахунку потрібно знати опір якоря електродвигуна, який було отримано у (4.13), $R_J = 0.09$ Ом та індуктивність якоря електродвигуна (L_J) яка розраховується за наступною формулою:

$$L_J = 0.5 \times \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ} p \omega_{НОМ}}, \quad (4.17)$$

де, p - число пар магнітних полюсів, та розраховується за формулою:

$$p = \frac{3000}{n_{НОМ}} \quad (4.18)$$

Розрахуємо (4.18) та на основі отриманих даних знайдемо індуктивність якоря електродвигуна за формулою(4.17):

					1A62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						32
Зм.	Лист	№ докцм.	Підпис	Дата		

$$p = \frac{3000}{450} = 6,66666 \approx 7, \quad (4.19)$$

$$L_{\text{я}} = 0.5 \times \frac{24}{24 \times 7 \times 47.1} = 0.00152 \text{ Гн} \quad (4.20)$$

Усі дані для розрахунку електромагнітної постійної часу прораховані, тому підставляємо їх у формулу (4.8):

$$T_E = \frac{0.00152}{0.09} = 0.01689 \quad (4.21)$$

У (4.21) було отримано значення електромагнітної постійної часу, яке становить 0.01689.

Переходимо до розрахунку електромеханічної постійної часу за формулою (4.9). Для розрахунку (4.9) необхідно мати наступні дані:

- опір якоря електродвигуна ($R_{\text{я}}$), який у результаті попередніх розрахунків становить 0.09 Ом;

- коефіцієнт пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання (C_B), який дорівнює 0.46369;

- момент інерції якоря ($I_{\text{п}}$), який розраховується за наступної формулою:

$$I_{\text{п}} = mR^2, \quad (4.22)$$

де, m - маса двигуна ($m = 5,4 \text{ кг}$);

R - радіус двигуна ($R = 0,01 \text{ м}$).

Коефіцієнт пропорційності (C_M), треба знайти за формулою:

$$C_M = \frac{M}{I_{\text{я}}}, \quad (4.23)$$

де, M - момент якоря електродвигуна;

$I_{\text{я}}$ - струм, що протікає у якорі.

Момент якоря електродвигуна й струм, що протікає у якорі, знаходимо за формулами:

$$M = C_B \times I_{\text{НОМ}}, \quad (4.24)$$

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{P_{\text{НОМ}}}{R_{\text{я}}}}, \quad (4.25)$$

де $P_{\text{НОМ}}$ - номінальна потужність.

Розрахуємо (4.24) та (4.25):

$$M = 0.46369 \times 24 = 11.12856, \quad (4.26)$$

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{450}{0.09}} = 70.71068 \text{ A} \quad (4.27)$$

Отже, знайдемо момент інерції якоря ($I_{\text{п}}$) за формулою (4.22) та коефіцієнт пропорційності (C_M) за формулою (4.23):

$$I_{\text{п}} = 5.4 \times 0.0001 = 0.00054, \quad (4.28)$$

$$C_M = \frac{11.12856}{70.71068} = 0.15738 \quad (4.29)$$

Підставляємо усі отримані дані вище у формулу (4.9) для знаходження електромеханічної постійної часу:

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						34
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

$$T_M = \frac{0.09 \times 0.00054}{0.46369 \times 0.15738} = 0.00069 \quad (4.30)$$

Електромеханічна постійна часу дорівнює 0.00069.

На основі усіх зроблених розрахунків, коефіцієнту пропорційності між ЕРС на обмотці якоря і швидкістю його обертання (K_D) та постійних часу (T_E , T_M) за формулою (4.6) отримаємо передавальну функцію:

$$W(s) = \frac{2.15661}{0.00001s^2 + 0.00069s + 1} \quad (4.31)$$

4.4 Математична модель об'єкту керування

Математична модель самого георадару описується типовою аперіодичною ланкою виду:

$$W(s) = \frac{9}{31.5s + 1} \quad (4.32)$$

На основі визначених передавальних функції будуємо математичну модель досліджуваної системи.

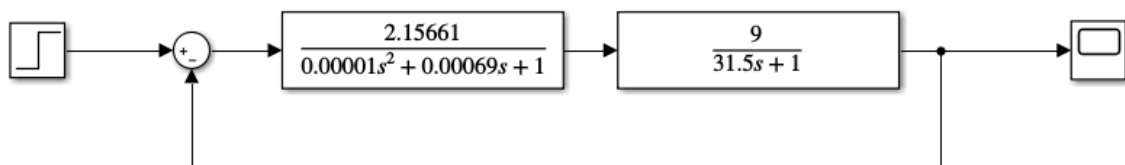


Рисунок 4.1 - Математична модель досліджуваної системи

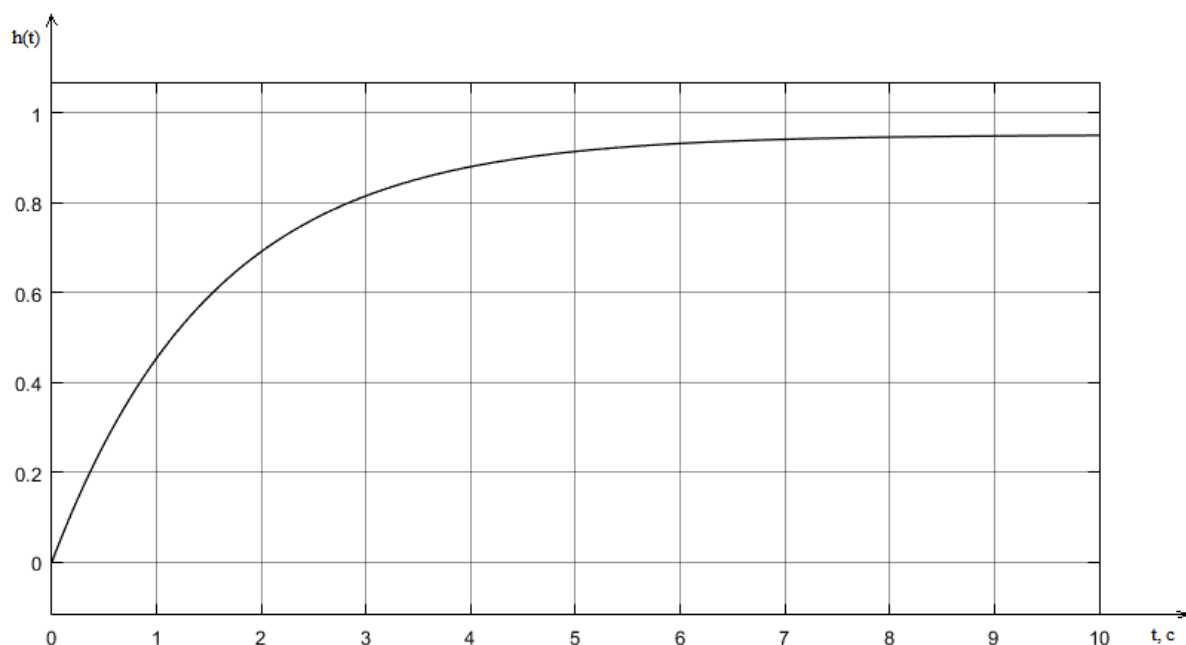


Рисунок 4.2 - Графік перехідного процесу

Таким чином розділі проведено усі необхідні розрахунки та визначені передавальні функції автоматизованої системи керування георадаром. Обрано конкретний тип електродвигуна. Розроблено структурну схему та побудовано перехідний процес за допомогою прикладного пакету MATLAB/Simulink.

5 АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ

Кожна система має бути стійкою, аби можливо було стверджувати що ця система здатна працювати добре. Тому головною метою цього розділу є доведення стійкості цифрової системи, застосовуючи критерії стійкості. Аби стверджувати що дана система є стійкою дослідження буде проведено трьома способами, а саме загальним, за критерієм Гурвіца та за критерієм Найквіста, та перевірено пакетом MATLAB.

5.1.Z-перетворення

Для початку аналізу якості системи, необхідно зробити z-перетворення усіх передавальних функцій цифрової системи. Зробимо розрахунок передавальних функцій скориставшись пакетом MATLAB.

Передавальна функція розімкненої цифрової системи має вид:

$$W(s) = \frac{19.40949}{0.00032s^3 + 0.02175s^2 + 31.50069s + 1} \quad (5.1)$$

Отримане z-перетворення у пакеті MATLAB за допомогою команди `c2d(w0, 0.1)` зображено на рисунку 5.1:

$$W(z) = \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.0001117} \quad (5.2)$$

Щоб зробити аналіз стійкості цифрової системи необхідно замкнути отримане z-перетворення у виразі (5.2).

					1A62.0905AK.005 ПЗ	Лист
						37
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

```

>> w0=tf([19.40949],[0.00032 0.02175 31.50069 1])

w0 =

          19.41
-----
0.00032 s^3 + 0.02175 s^2 + 31.5 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> wz = c2d(w0, 0.1)

wz =

      0.06112 z^2 - 0.00362 z + 7e-05
-----
      z^3 - 1.062 z^2 + 0.06617 z - 0.001117

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Рисунок 5.1 - Z-перетворення за допомогою командної строки пакету
MATLAB

Формула для знаходження передавальної функції замкненої цифрової системи:

$$W_3(z) = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)} \quad (5.3)$$

Знайдемо передавальну функцію замкненої цифрової системи (5.2) за формулою (5.3):

$$W_3(z) = \frac{\frac{0,06112z^2 - 0,00362z + 0,00007}{z^3 - 1,062z^2 + 0,06617z - 0,001117}}{1 + \frac{0,06112z^2 - 0,00362z + 0,00007}{z^3 - 1,062z^2 + 0,06617z - 0,001117}} =$$

$$\begin{aligned}
& \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.001117} = \\
& = \frac{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.001117 + 0.06112z^2 + 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.001117} = \\
& = \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105} = \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105}
\end{aligned}
\tag{5.4}$$

5.2 Дослідження стійкості за загальним критерієм

Дослідження стійкості за загальним критерієм полягає у знаходженні коренів характеристичного рівняння замкнутої цифрової системи.

Передавальну функцію замкненої системи було знайдено у виразі (5.4), надалі застосовуємо її для розрахунків, а саме визначаємо з неї характеристичне рівняння. Знаменник виразу (5.4) є характеристичним рівнянням замкнутої системи й позначається, як $D(z)$:

$$D(z) = z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105 \tag{5.5}$$

Аби знайти корені характеристичного рівняння (5.5) потрібно вирішити кубічне рівняння:

$$z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105 = 0 \tag{5.6}$$

Вирішуємо кубічне рівняння (5.6), а саме, зводимо його до приведенного вигляду.

Нехай, $a = -1.00088$; $b = 0.06255$; $c = -0.00105$, які позначають коефіцієнти при z^2 , z й вільний член. Робимо наступну підстановку:

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						39
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

$$z = y - \frac{a}{3} = y + 0.3336267 \quad (5.7)$$

У результаті отримуємо рівняння приведенного вигляду:

$$y^3 + py + q = 0, \quad (5.8)$$

де

$$p = -\frac{a^2}{3} + b = -\frac{(-1.00088)^2}{3} + 0.06255 = -0.333920258 + 0.06255 = -0.271370258 \quad (5.9)$$

$$q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c = 2\left(\frac{-1.00088}{3}\right)^3 + \frac{1.00088 \times 0.06255}{3} - 0.00105 = -2 \times (0.3362667)^3 + 0.020869348 - 0.00105 = -0.054451454 \quad (5.10)$$

Визначаємо, має й рівняння комплексні корені. Для цього знаходимо дискримінант за наступною формулою:

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 = \left(\frac{-0.271370258}{3}\right)^3 + \left(\frac{-0.054451454}{2}\right)^2 = (-0.090456753)^3 + (-0.027225727)^2 = -0.000740156 + 0.0007412402 = 0.000001084 \quad (5.11)$$

Дискримінант додатній. З цього виходить, що рівняння має один звичайний корінь й два комплексних.

Оскільки дискримінант додатній, знаходимо корені по формулі Кардано:

					IA62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$y_1 = A + B, \quad (5.12)$$

$$y_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm j \frac{A-B}{2} \sqrt{3}, \quad (5.13)$$

де,

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, \quad (5.14)$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} \quad (5.15)$$

Для здійснення подальших розрахунків знайдемо корінь Q :

$$\sqrt{Q} = \sqrt{0.000001084} = 0.001041254 \quad (5.16)$$

Розрахуємо A та B за формулами (5.14) та (5.15) а потім їх суму та різницю для подальших розрахунків:

$$\begin{aligned} A &= \sqrt[3]{-\frac{(-0.054451454)}{2} + 0.0010041254} = \sqrt[3]{0.027225727 + 0.001041254} = \\ &= 0.304620979 \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$B = \sqrt[3]{0.027225727 - 0.001041254} = 0.296948598 \quad (5.18)$$

$$y_1 = A + B = 0.304620979 + 0.296948598 = 0.601569577 \quad (5.19)$$

$$A - B = 0.304620979 - 0.296948598 = 0.007672381 \quad (5.20)$$

У ході розрахунку (5.19) знайшли y_1 так як сума A та B й є формулою (5.12).

На основі отриманих результатів у виразах (5.19) та (5.20) знайдемо $y_{2,3}$ за формулою (5.13):

					ІА62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						41
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

$$y_{2,3} = -\frac{0.601569577}{2} \pm j \frac{0.007672381}{2} \sqrt{3} =$$

$$= -0.3007847885 \pm j0.006644666 \quad (5.21)$$

Завдяки розрахункам (5.19) та (5.21) можемо підставити значення у формулу (5.7) та знайти усі три корені характеристичного рівняння (5.6):

$$z_1 = 0.6016 + 0.3336 = 0.9352 \quad (5.22)$$

$$z_{2,3} = -0.3008 + 0.3336 \pm j0.0066 = 0.0328 \pm j0.0066 \quad (5.23)$$

Знайдено усі корені характеристичного рівняння, завдяки яким можливо стверджувати стійка системи чи ні, якщо виконується наступна умова:

$$|z_i| < 1, \quad (5.24)$$

що відповідає розташуванню коренів характеристичного рівняння у колі одиничного радіусу на z - площині.

Перевіримо, чи відповідають отримані корені характеристичного рівняння умові стійкості цифрової системи (5.24). Знайдемо модуль комплексних коренів:

$$|z_{2,3}| = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{0.0328^2 + 0.0066^2} = \sqrt{0.00107584 + 0.00004356} =$$

$$= \sqrt{0.0011194} = 0.0335, \quad (5.25)$$

де u - уявна частина;

v - дійсна частина.

					IA62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						42
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки,

$$|z_1| = 0.9352 < 1, \quad (5.26)$$

$$|z_{2,3}| = 0.0335 < 1 \quad (5.27)$$

то, система стійка.

5.3 Стійкість системи за критерієм Гурвіца

Для застосування критерію Гурвіца, необхідно виконати білінійне перетворення для чого у характеристичне рівняння цифрової системи (5.5) використовується наступна підстановка:

$$z = \frac{1 + \omega}{1 - \omega} \quad (5.28)$$

Виконуємо заміну (5.28) у виразі (5.6):

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1 + \omega}{1 - \omega} \right)^3 - 1.00088 \left(\frac{1 + \omega}{1 - \omega} \right)^2 + 0.06255 \left(\frac{1 + \omega}{1 - \omega} \right) - 0.00105 = 0 \\ & \frac{1 + 3\omega + 3\omega^2 + \omega^3}{1 - 3\omega + 3\omega^2 - \omega^3} - 1.00088 \left(\frac{1 + 2\omega + \omega^2}{1 - 2\omega + \omega^2} \right) + 0.06255 \left(\frac{1 + \omega}{1 - \omega} \right) - 0.00105 = 0 \\ & \frac{1 + 3\omega + 3\omega^2 + \omega^3 - 1.00088(1 + 2\omega + \omega^2)(1 - \omega) + 0.06255(1 + \omega)(1 - 2\omega + \omega^2) -}{1 - 3\omega + 3\omega^2 - \omega^3} \\ & \frac{-0.00105(1 - 3\omega + 3\omega^2 - \omega^3)}{1 - 3\omega + 3\omega^2 - \omega^3} \end{aligned} \quad (5.29)$$

В отриманому виразі (5.29) розглядається тільки чисельник до якого застосовують критерій Гурвіца. Тому продовжимо розрахунок виразу (5.29) без урахування знаменника

$$\begin{aligned}
 &1 + 3\omega + 3\omega^2 + \omega^3 - 1.00088(1 + 2\omega + \omega^2 - \omega - 2\omega^2 - \omega^3) + \\
 &+ 0.06255(1 + \omega - 2\omega - 2\omega^2 + \omega^2 + \omega^3) - 0.00105(1 - 3\omega + 3\omega^2 - \omega^3) = \\
 &= 1 + 3\omega + 3\omega^2 + \omega^3 - 1.00088 - 2.00176\omega - 1.00088\omega^2 + 1.00088\omega + \\
 &+ 2.00176\omega^2 + 1.00088\omega^3 + 0.06255 + 0.06255\omega - 0.1251\omega - 0.1251\omega^2 + \\
 &+ 0.06255\omega^2 + 0.06255\omega^3 - 0.00105 + 0.00315\omega - 0.00315\omega^2 + 0.00105\omega^3 = \\
 &= 1.0636\omega^3 + 3.93518\omega^2 + 1.93972\omega + 0.06062 = 0
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

Для даного рівняння третього порядку використаємо окремий випадок критерію Гурвіца:

$$\begin{cases} a_i > 0, \\ a_1 \times a_2 - a_0 \times a_3 \end{cases} \tag{5.31}$$

Перевіримо на стійкість цифрову систему, за правилом (5.31) за коефіцієнтами отриманими у рівнянні (5.30):

$$\begin{cases} a_i > 0, \\ 7.633 - 0.064 = 7.569 > 0 \end{cases} \tag{5.32}$$

Згідно, системи нерівностей (5.32), можемо зробити висновок, що цифрова систем за критерієм Гурвіца є стійкою.

					1A62.090БАК.005 ПЗ	Лист
						44
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

5.4 Стійкість системи за критерієм Найквіста

Перевіряємо цифрову систему за критерієм Найквіста у пакеті MATLAB. Для побудови графіку АФЧХ, за яким є можливість впевнитись у стійкості системи, треба скористатись командним рядком пакету MATLAB. У командному рядку треба ввести команду `nyquist(wz)`. На рисунку 5.2 отримали графік АФЧХ для системи зображеної на рисунку 4.1.

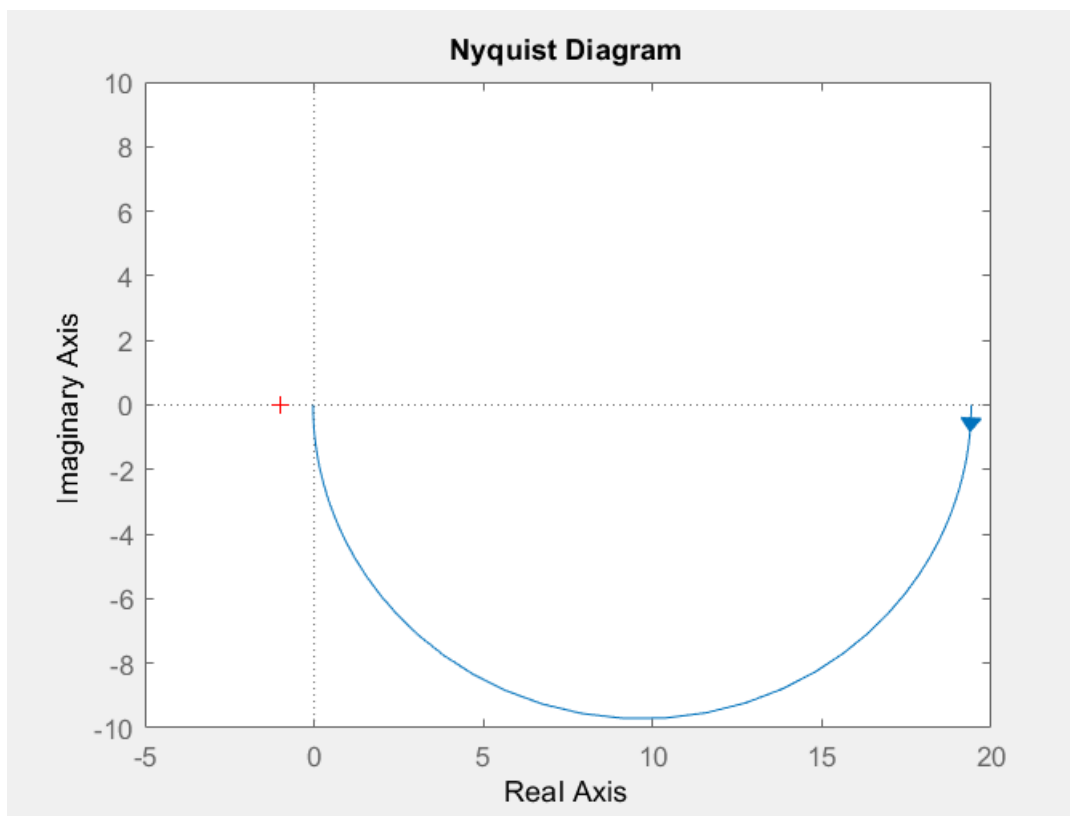


Рисунок 5.2 - АФЧХ цифрової системи

У висновку даного розділу стверджуємо, що цифрова система задана на рисунку 4.1 є стійкою, що підтверджено за трьома критеріями аналітично та за допомогою пакету MATLAB. Також ще одним підтвердженням стійкості даної цифрової системи є графік перехідного процесу, який зображено на рисунку 4.2.

6 АНАЛІЗ ЯКОСТІ СИСТЕМИ

Кожна розроблена система має мати гарну якість та відсутність помилок. Тому метою даного розділу є дослідження впливу параметрів цифрової системи на показники якості перехідного процесу й визначення похибки сталого процесу, якщо вона існує. Дослідження буде проведено аналітично. Отримані результати якого буде підтверджено за допомогою пакета MATLAB.

Під час проведення дослідження якості системи можна визначити такі показники, як, перерегулювання, час встановлення та час регулювання.

Після повного z -перетворення та замкнення отриманої після z -перетворення системи (5.4) переходимо до аналізу якості цифрової системи. Для цього нам ще необхідне z -перетворення одиничного стрибка:

$$\begin{aligned}x(t) &= 1(t), \\ X(z) &= Z\{1(t)\} = \frac{z}{z-1}\end{aligned}\tag{6.1}$$

Далі переходимо до визначення похибки цифрової системи:

$$\begin{aligned}E(z) &= X(z)(1 - W_3(z)) = \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105} \right) = \\ &= \frac{z}{z-1} \left(\frac{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105 - 0.06112z^2 + 0.00362z - 0.00007}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105} \right) = \\ &= \frac{z}{z-1} \left(\frac{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.00112}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105} \right) = \\ &= \frac{z^4 - 1.062z^3 + 0.06617z^2 - 0.00112}{(z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105)(z-1)}\end{aligned}\tag{6.2}$$

На основі отриманих даних тепер можемо визначити сталу похибку:

$$\begin{aligned}
 e_{CT} &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)E(z) = \\
 &= \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \frac{z^4 - 1.062z^3 + 0.06617z^2 - 0.00112z}{(z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105)(z-1)} = \\
 &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4 - 1.062z^3 + 0.06617z^2 - 0.00112z}{z^3 - 1.00088z^2 + 0.06255z - 0.00105} = \frac{1 - 1.062 + 0.06617 - 0.00112}{1 - 1.00088 + 0.06255 - 0.00105} = \\
 &= \frac{0.00305}{0.06062} = 0.05031
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Отже, стала похибка цифрової системи розрахована аналітично дорівнює 0.05031. Зробимо перевірку цього значення за допомогою пакета MATLAB. Модель цифрової системи у MATLAB зображено на рисунку 6.1.

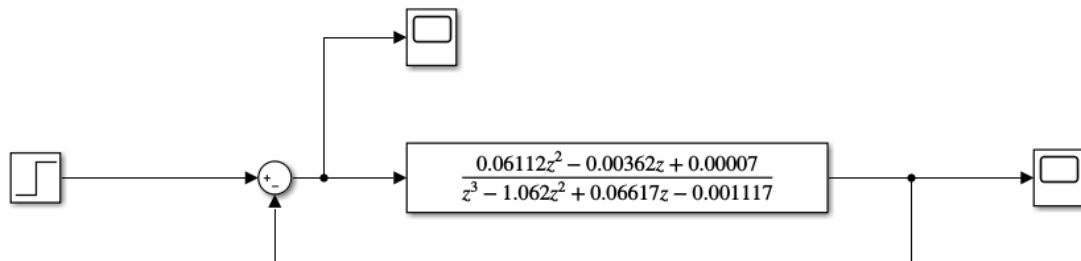
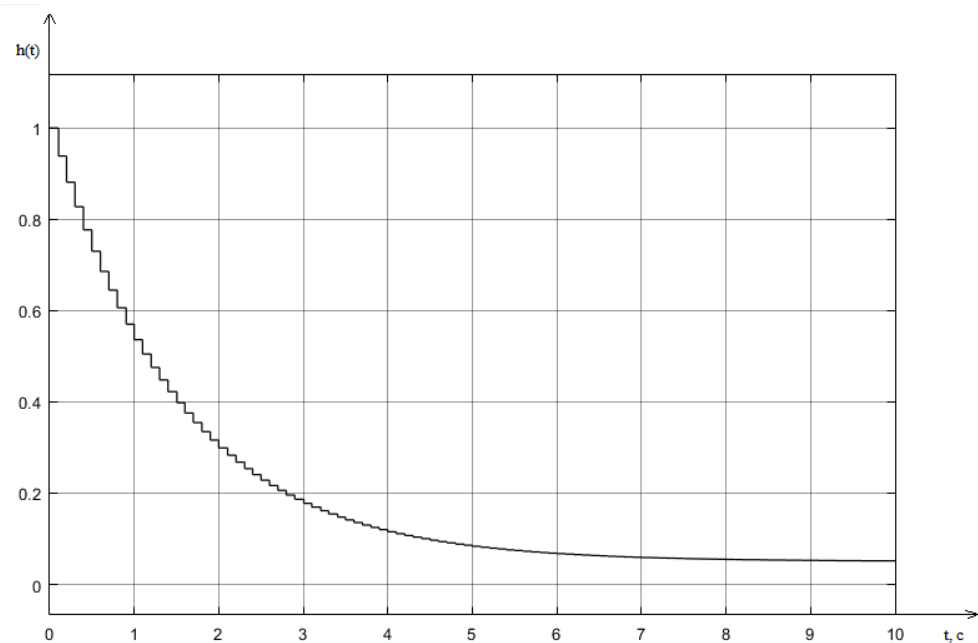


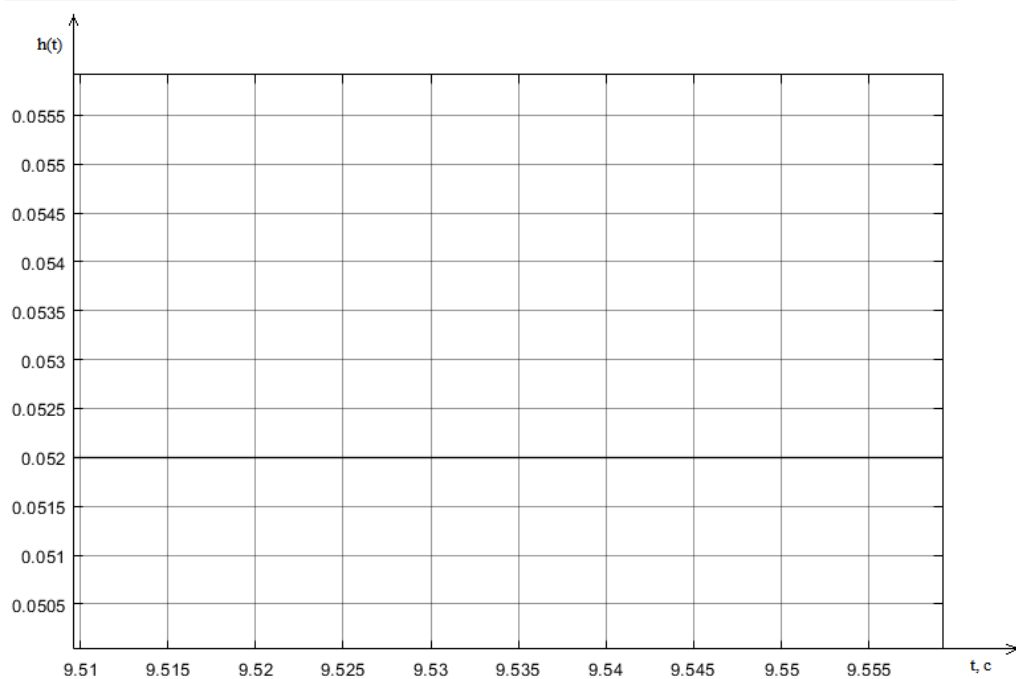
Рисунок 6.1 - Модель цифрової системи

Графік похибку цифрової системи при одиничному стрибку зображено на рисунку 6.2

Аналітично прорахована стала похибка цифрової системи дорівнює 0.05031, а згідно Рисунку 6.2(б) 0.052. Обидва значення при округленні до сотих дорівнюють 0.05. Отже, аналітично прорахована похибка є вірною.



а)



б)

Рисунок 6.2 - Похибка цифрової системи при одиничному стрибку

а) графік похибки цифрової системи;

б) збільшена ділянка графіку похибки цифрової системи, що відповідає сталому значенню;

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

IA62.090БАК.005 ПЗ

Лист

48

6.1 Показники якості цифрової системи

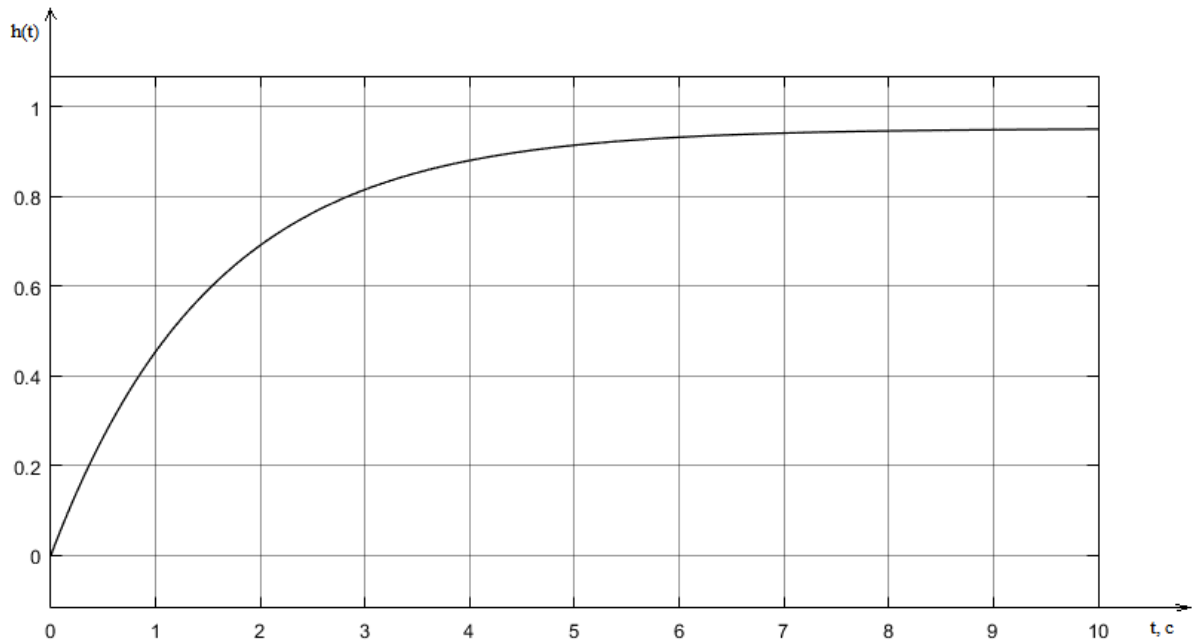


Рисунок 6.3 - Графік перехідного процесу цифрової системи

Розрахуємо перерегулювання цифрової системи:

$$h = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{1} \times 100\% = \frac{0.948 - 0.948}{1} \times 100\% = 0 \quad (6.4)$$

Згідно графіку перехідного процесу зображеного на рисунку 6.3 и виразу 6.4, цифрова система має наступні показники якості:

- час встановлення 7.2с;
- час перехідного процесу 4.8с;
- перерегулювання 0;
- похибка 0.05%.

Підводячи підсумки стверджуємо, що отримані показники якості перехідного процесу системи не відповідають очікуваним та необхідним для якісної системи характеристикам. Аби покращити отримані показники якості було прийнято рішення розробити синтез цифрового регулятора.

7 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОСЛІДЖУВАНОЇ СИСТЕМИ

Згідно виконаного аналізу якості досліджувана система має установлену помилку , великий час регулювання, необхідно виконати синтез цифрового регулятора декількома методами та обрати той що забезпечить задану якість за вимогами технічного завдання на дипломний проєкт.

7.1 Регулятор, заснований на виборі бажаних передавальних функцій замкненої системи

Для отриманої передавальної функції цифрової системи виберемо загальний вид бажаної передавальної функції замкненої системи за відповідним алгоритмом.

Синтезована система має забезпечувати астатизм першого порядку відносно одиничного стрибка на вході. Тому, запишемо передавальну функцію (5.2) у вигляді:

$$W_z = \frac{0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007}{z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.001117} \quad (7.1)$$
$$r=0; r=1$$

Виконаємо факторизацію за формулою:

$$W_{ПБЧ}(z) = \frac{B(z)}{C(z)} = \frac{B^-(z) \times B^+(z)}{C^-(z) \times C^+(z)}, \quad (7.2)$$

де, $B(z)$, $C(z)$ - поліноми ступенів $\|B^-\|$ і $\|C^-\|$, що лежать поза колом одиничного радіуса,

$B^+(z)$, $C^+(z)$ - поліноми ступенів $\|B^+\|$ і $\|C^+\|$, що лежать у колі одиничного радіуса.

За формулою (7.2) зробимо факторизацію з передавальною функцією (5.2), так як, усі поліноми ступенів лежать у колі одиничного радіуса отримаємо наступні вирази:

$$C^+(z) = z^3 - 1.062z^2 + 0.06617z - 0.001117, \quad (7.3)$$

$$B^+(z) = 0.06112z^2 + 0.00362z + 0.00007 \quad (7.4)$$

Оскільки необхідно забезпечити астатизм, визначаємо вид бажаної передавальної функції замкнутої системи за наступними формулами:

$$\Phi(z) = \frac{B(z) \times M_1(z)}{Q(z)} \quad (7.5)$$

$$1 - \Phi(z) = \frac{(z-1)^r C^-(z) N_1(z)}{Q(z)} \quad (7.6)$$

Визначаємо вид поліному. Зазвичай він має наступний вигляд:

$$Q(z) = (z - \alpha)^k, \quad (7.7)$$

де $|\alpha| < 1$.

За виразом (7.7) визначаємо вид поліному для передавальної функції (7.1):

$$Q(z) = (z - 0.5)^3 = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.125 \quad (7.8)$$

Визначаємо N_1 і M_1 за формулою:

$$B(z) \times M_1(z) + (z-1)^r C_1^-(z) \times N_1(z) = Q(z), \quad (7.9)$$

при цьому $\|N_1\| \geq \|B\|$ та $\|M_1\| \geq \|C_1^-\| + r - 1$.

За формулою (7.9) знайдемо N_I і M_I :

$$\|N_1\| = 2, \quad N_1(z) = n_2(z) + n_1(z) + n_0 \quad (7.10)$$

$$\|M_1\| = 0 + 1 - 1 = 0, \quad M_1 = m_0 \quad (7.11)$$

$$\begin{aligned} & (0.06112z^2 - 0.00362z + 0.00007)m_0 + (z-1)(n_2z^2 + n_1z + n_0) = \\ & = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.125 \\ & n_2z^3 + 0.06112z^2m_0 + n_1z^2 - n_2z^2 - 0.00362zm_0 + n_0z - n_1z + 0.00007m_0 - n_0 = \\ & = z^3 - 1.5z^2 + 0.75z - 0.125 \end{aligned} \quad (7.12)$$

Згідно отриманих даних з виразу (7.12) є можливість створити наступну систему рівнянь, за допомогою якої можна розрахувати коефіцієнти n_0 , n_1 , n_2 , m_0 :

$$\begin{cases} n_2 = 1 \\ n_1 - n_2 + 0.06112m_0 = -1.5 \\ n_0 - n_1 - 0.00362m_0 = 0.75 \\ 0.00007m_0 - n_0 = -0.125 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_2 = 1 \\ n_1 = -0.5 - 0.06112m_0 \\ n_0 = 0.125 + 0.00007m_0 \\ 0.125 + 0.00007m_0 - n_1 - 0.00362m_0 = 0.75 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_2 = 1 \\ n_1 = -0.5 - 0.06112m_0 \\ n_0 = 0.125 + 0.00007m_0 \\ 0.125 + 0.00007m_0 + 0.5 + 0.06112m_0 - 0.00362m_0 = 0.75 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_2 = 1 \\ n_1 = -0.5 - 0.06112m_0 \\ n_0 = 0.125 + 0.00007m_0 \\ 0.05757m_0 = 0.125 \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_2 = 1 \\ n_1 = 0.63271 \\ n_0 = 0.12515 \\ m_0 = 2.17127 \end{cases} \quad (7.13)$$

Переходимо до визначення передавальної функції цифрового регулятора за формулою:

$$D(z) = \frac{(z-1)^{r_0-r} \times C_1^+(z) \times M_1(z)}{N_1(z)}, r_0 \geq r_1, \quad (7.14)$$

$$\begin{aligned} D(z) &= \frac{2.1712z^3 - 2.30589z^2 + 0.14367z - 0.00243}{(z-1)(z^2 - 0.63271z + 0.12515)} = \\ &= \frac{2.1712z^3 - 2.30589z^2 + 0.14367z - 0.00243}{z^3 - 0.63271z^2 + 0.12515z - z^2 + 0.63271z - 0.12515} = \\ &= \frac{2.1712z^3 - 2.30589z^2 + 0.14367z - 0.00243}{z^3 - 1.63271z^2 + 0.75786z - 0.12515} \end{aligned} \quad (7.15)$$

Модель отримана після розрахунку (7.15) зображена на рисунку 7.1.

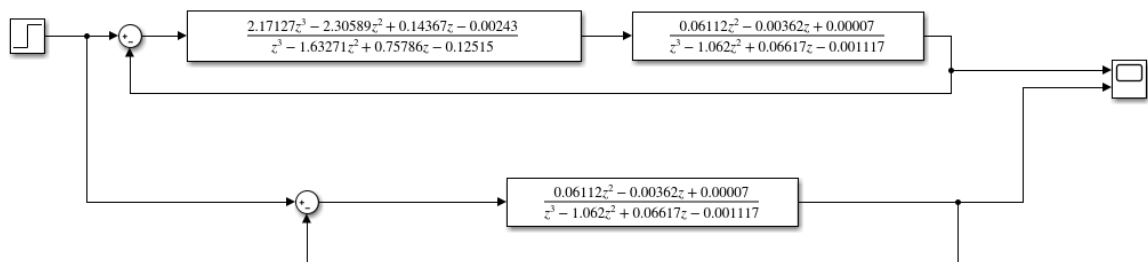


Рисунок 7.1 - Модель цифрової системи з регулятором та без

Графік перехідного процесу цифрової системи, яка зображено на рисунку 7.1 показано на рисунку 7.2

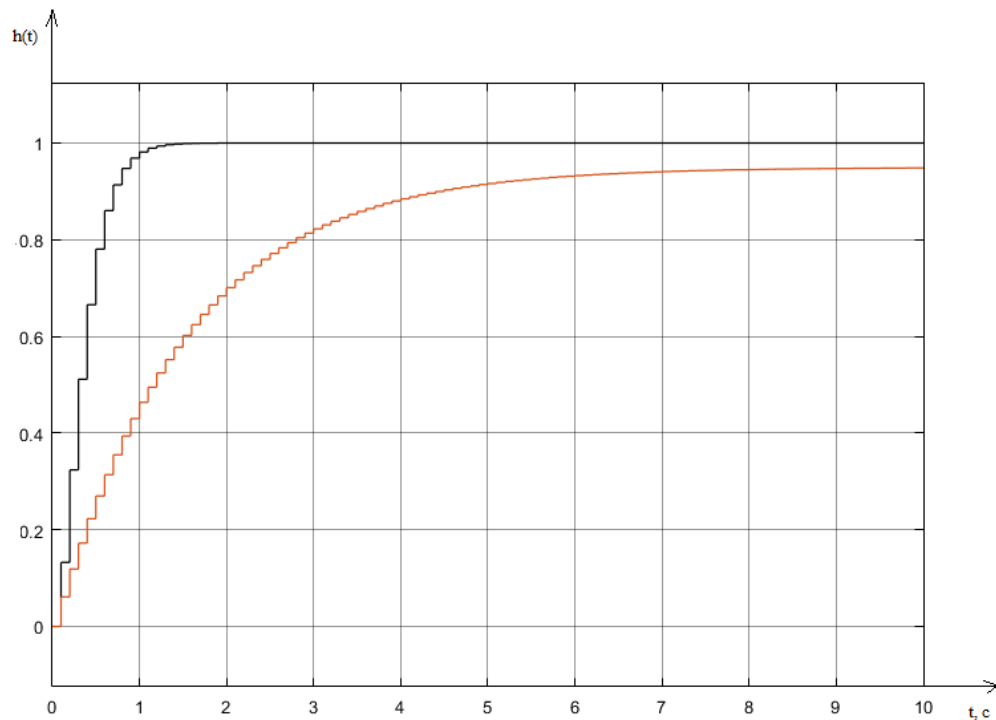


Рисунок 7.2 - Графік перехідного процесу з цифровим регулятором й без

Показники якості перехідного процесу регулювання:

- час встановлення 1.4с;
- час перехідного процесу 0.8с;
- перерегулювання 0%;
- похибка 0.

З отриманих даних після регулювання, стала похибка дорівнює 0, час становлення перехідного процесу скоротився більше ніж у три рази. Можемо стверджувати, що у виразі (7.1.15) було отримано передавальну функцію, яка досягає мету даного розділу.

7.2. Розроблення ПІД-регулятора

Не дивлячись на те, що розроблений регулятор за бажаною функцією задовольняє потреби покращення якості характеристик перехідного процесу, моделюємо ПІД - регулятор, аби впевнитись в обраному рішенні та зробити детальне дослідження регуляторів під час навіть малих коливань системи.

Для моделювання ПІД-регулятора було підібрано наступні коефіцієнти:

$$K_p = 2.165, K_i = 0.0694, K_d = 0.00005$$

Аби змоделювати ПІД регулятор з наступними коефіцієнтами потрібно розрахувати такі формули, при $T_0=0.1$:

$$\frac{T_0 K_i}{2} = \frac{0.1 \times 0.0694}{2} = 0.00347 \quad (7.16)$$

$$\frac{K_d}{T_0} = \frac{0.00005}{0.1} = 0.0005 \quad (7.17)$$

Розробимо модель досліджуваної системи з розрахунком ПІД-регулятором. Модель підбраного ПІД-регулятора з урахуванням (7.16), (7.17) та звичайного коефіцієнту K_d подана на рисунку 7.3.

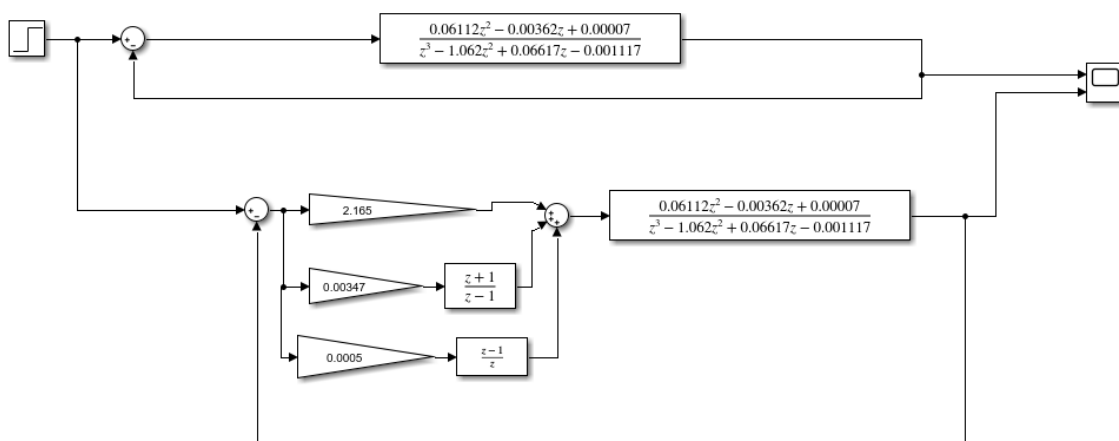


Рисунок 7.3 - Модель досліджуваної системи без й з ПІД-регулятор

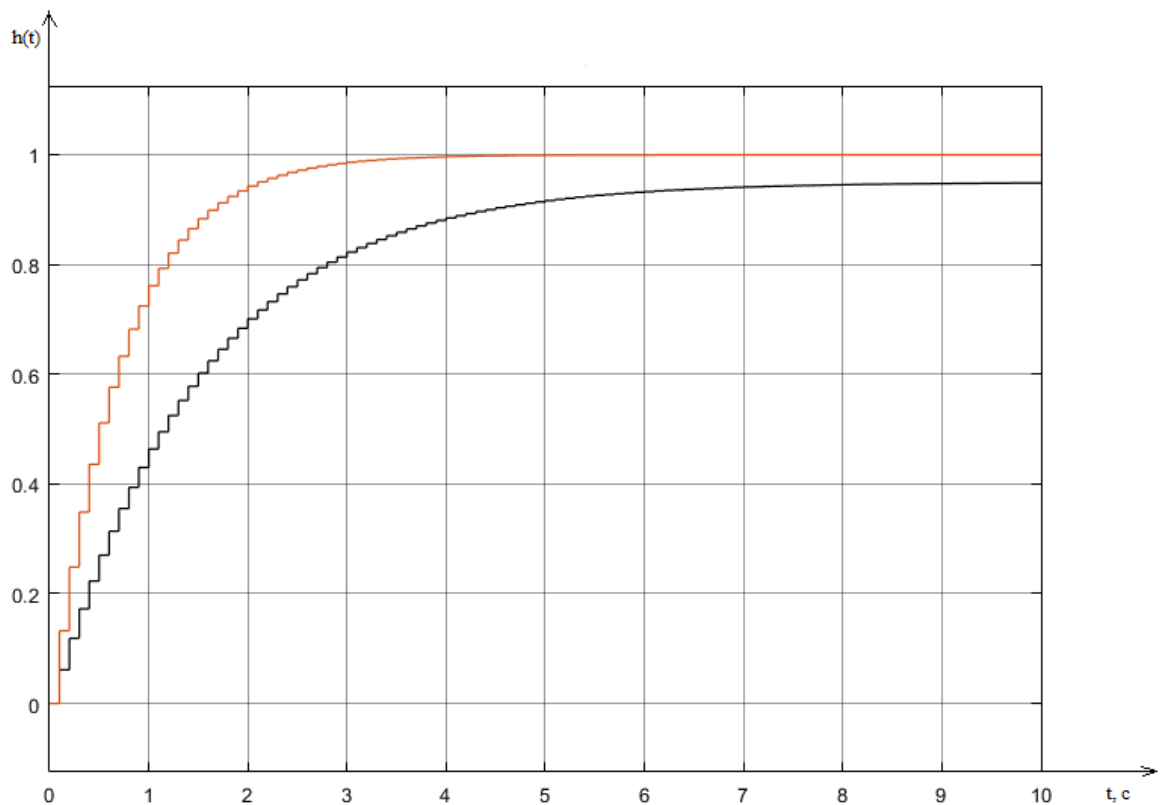


Рисунок 7.4 - Графік перехідного процесу з ПД-регулятором й без

Показники якості перехідного процесу регулювання:

- час встановлення 4с;
- час перехідного процесу 1.8с;
- перерегулювання 0%;
- похибка 0.

При регулюванні за допомогою ПД-регулятора вдалося позбавитись сталої похибки, так само, як й при регулюванні за допомогою регулятора отриманого за бажаною функцією. Але час установа та час перерегулювання у випадку з регулятором за бажаною функцією набагато краще. Проведене далі дослідження грубості обох регуляторів, після безпосередньої декомпозиції, покаже, який саме регулятор треба обрати для покращення якісних характеристик системи.

7.3. Дослідження регуляторів на грубість

Під час розрахунків ПІД-регулятора й регулятора за бажаними функціями було виявлено, що якісні характеристики перехідного процесу поліпшаються краще, з використанням регулятора за бажаними функціями. Але справжній перехідний процес не завжди є стабільним, тому потрібно перевірити, який з двох розрахованих регуляторів більш стійкий до різного розміру коливань коефіцієнту підсилення.

З виразу (5.2) отримаємо коефіцієнт підсилення, він становить 0.06112. Збільшимо коефіцієнт підсилення, у моделі порівняння регулятора отриманого за бажаною функцією, на 0.01 тоді він буде становити 0.07112. Дане збільшення показано на рисунку 7.5.

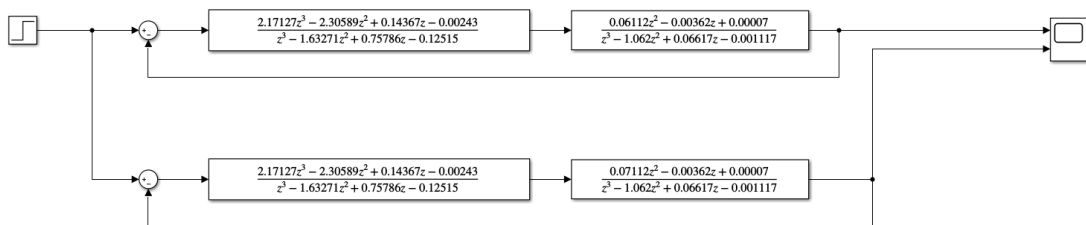


Рисунок 7.5 - Модель порівняння регуляторів за бажаною функцією

Згідно моделі зображеної на рисунку 7.5 отримали графік перехідного процесу, який подано на рисунку 7.6.

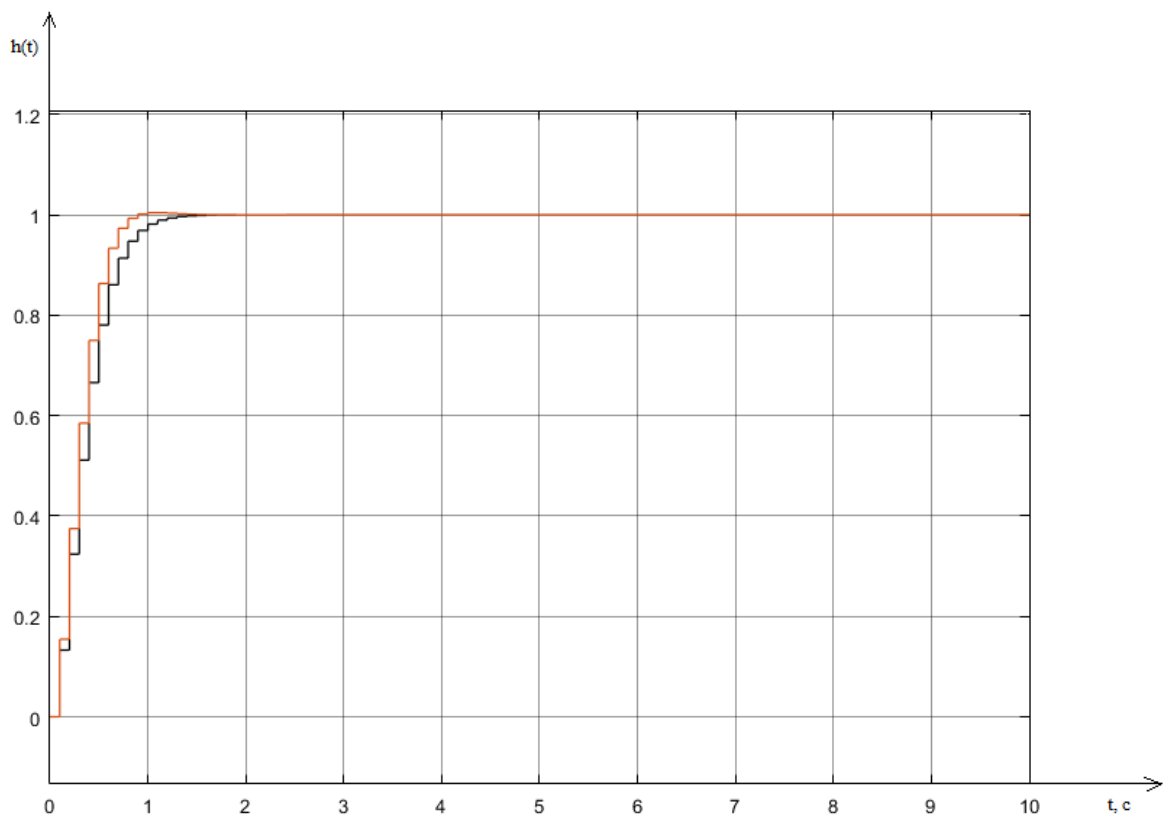


Рисунок 7.6 - Графік порівнянь перехідних процесів регуляторі за бажаною функцією

Згідно отриманого графіку порівнянь зображеного на рисунку 7.6 можна стверджувати, що коливання коефіцієнту підсилення у 0.01, для регулятора отриманого за бажаною функцією, є незначним та майже не змінює графік отриманий шляхом розрахунку. Тому збільшуємо коефіцієнт підсилення на 0.1. Графік перехідного процесу при коефіцієнті підсилення 0.16112 зображено на рисунку 7.7.

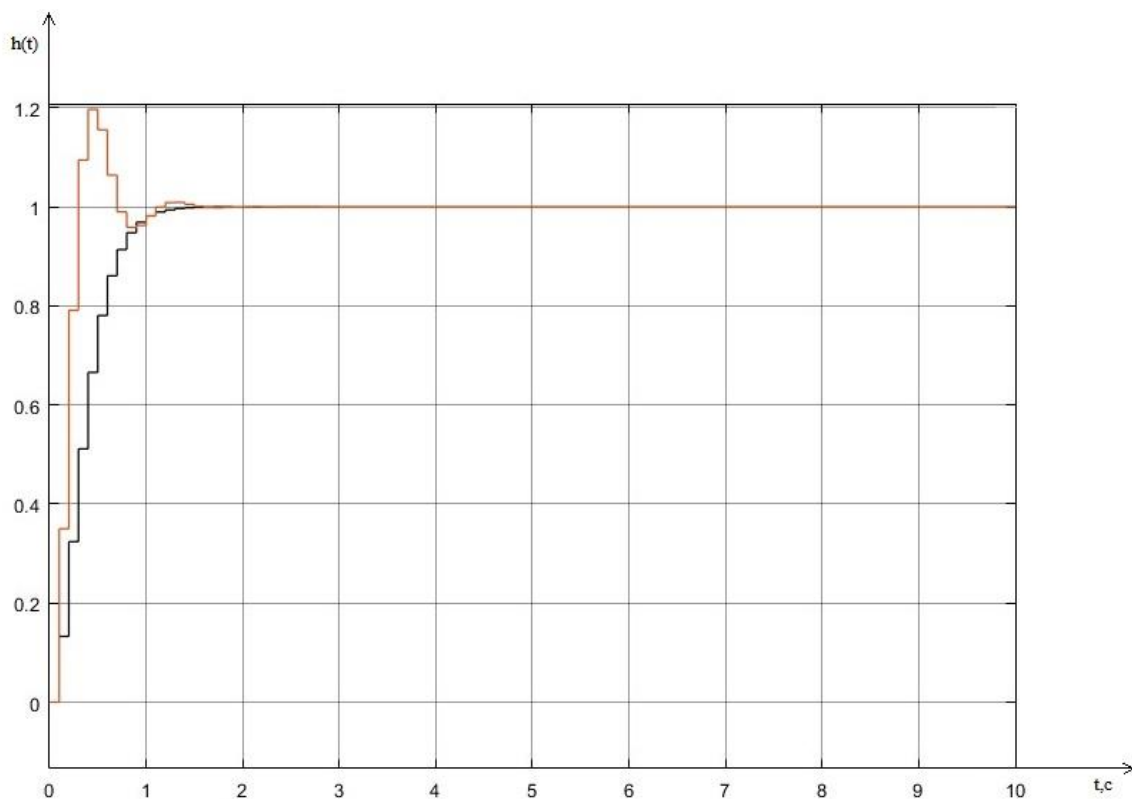


Рисунок 7.7 - Графік порівнянь перехідних процесів регулятора за бажаною функцією

Згідно рисунку 7.7 видно, що коливання коефіцієнта підсилення у 0.1 є значними й регулятор вже не врегульовує перехідний процес. З'являється не допустиме перерегулювання близько 20%. Можна стверджувати що при коливаннях системи близько 0.1 регулятор за вибором бажаної функції не підходить.

Перевіримо таким же чином ПД-регулятор на грубість. На рисунку 7.8 зображено модель для порівняння регулювання ПД-регулятором звичайної передавальної функції, отриманої у виразі (5.2) й регулювання передавальної функції з різними значеннями коливань коефіцієнта підсилення. Спочатку підвищимо коефіцієнт підсилення на 0.01.

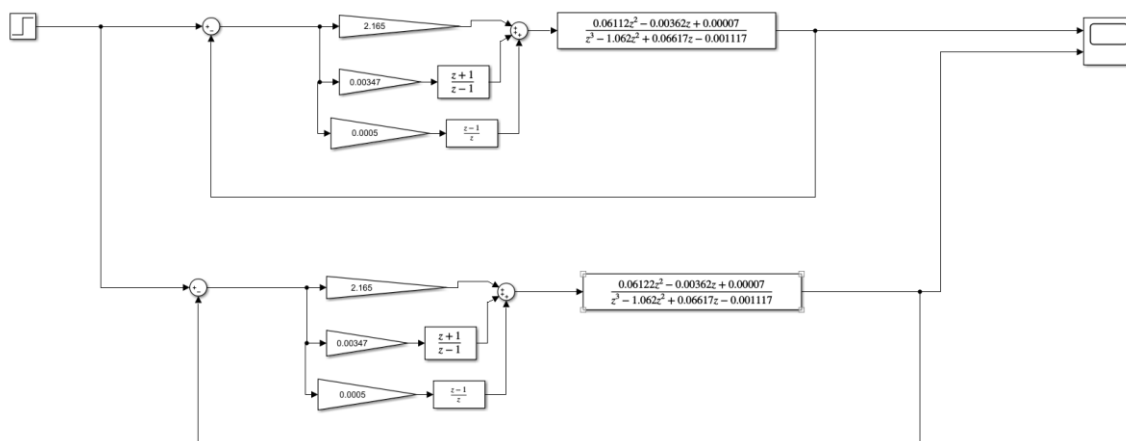


Рисунок 7.8 - Модель ПД-регуляторів для порівняння

На рисунку 7.9 зображено отриманий графік порівняння перехідного процесу регулювання ПД-регулятором передавальної функції (5.2) й функції з коефіцієнтом підсилення збільшеного на 0.01.

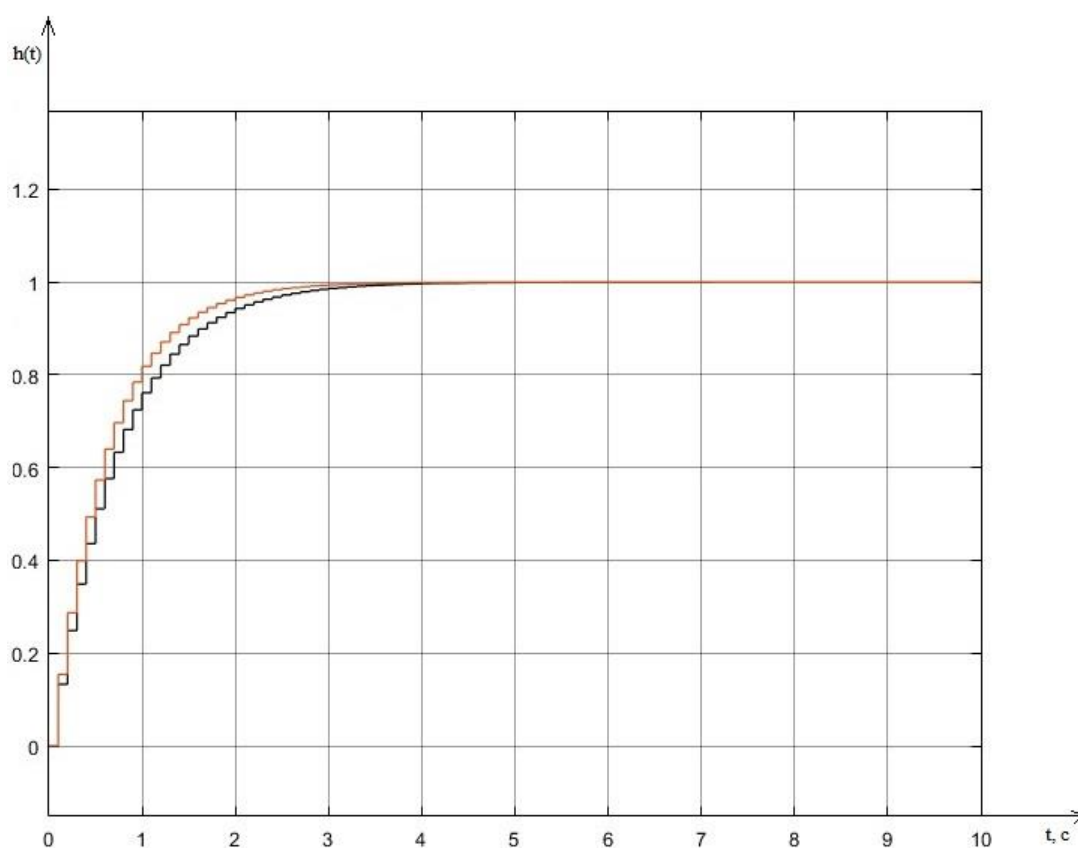


Рисунок 7.9 - Графік порівнянь перехідних процесів ПД-регулятора

Згідно рисунку 7.9, на якому зображено графік порівнянь регулювання ПІД-регулятором з передавальною функцією й передавальною функцією зі збільшеним коефіцієнтом на 0.01, бачимо, що дане збільшення впливає на перехідний процес, але не так сильно, аби порушити регулювання. Збільшуємо коефіцієнт підсилення на 0.1 й робимо порівняння отриманих графіків, зображене на рисунку 7.10.

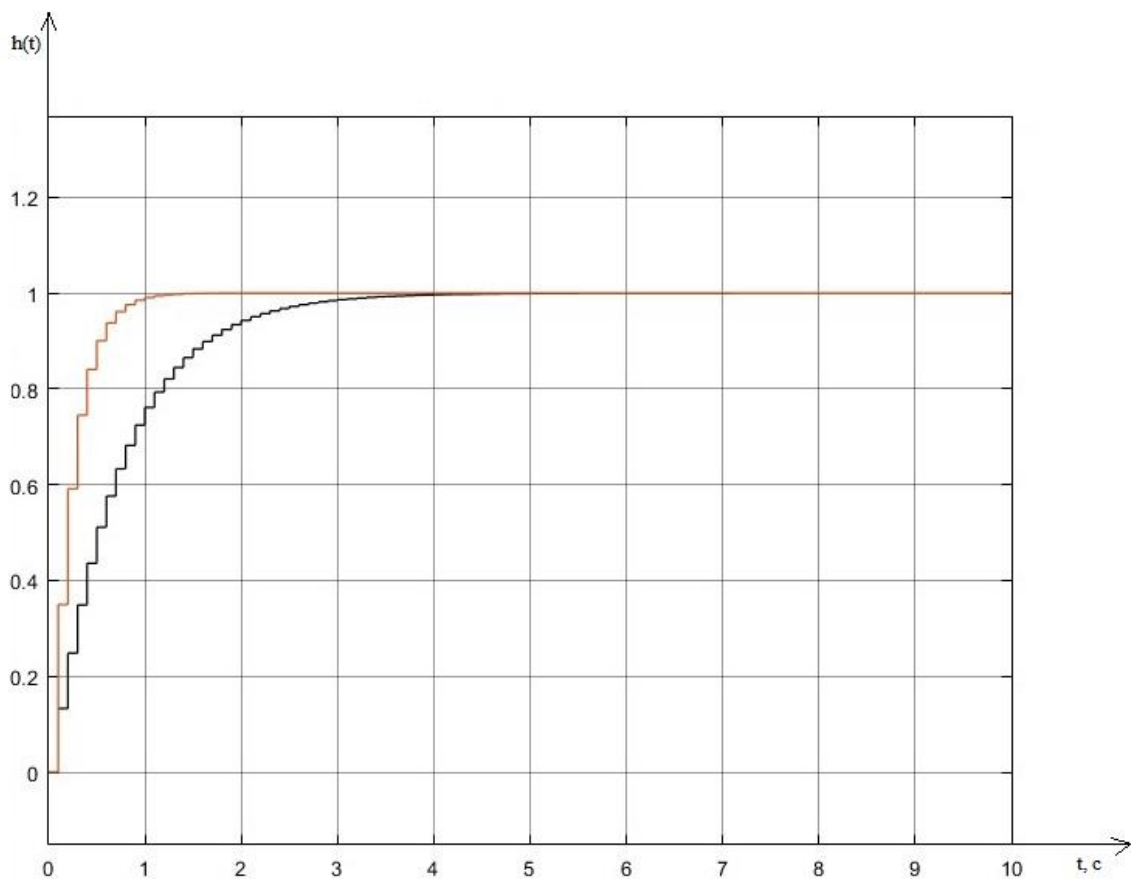


Рисунок 7.10 - Графік порівнянь перехідних процесів ПІД-регулятора

Навіть, при збільшенні коефіцієнта підсилення на 0.1 ПІД-регулятор не втратив необхідних характеристик регулювання й може надавати системі якісне регулювання. Аби знайти при якому збільшенні коефіцієнта підсилення характеристики ПІД-регулятора не будуть придатними для регулювання,

спробуємо збільшити коефіцієнт підсилення на 0.5. Це порівняння буде зображено на рисунку 7.11.

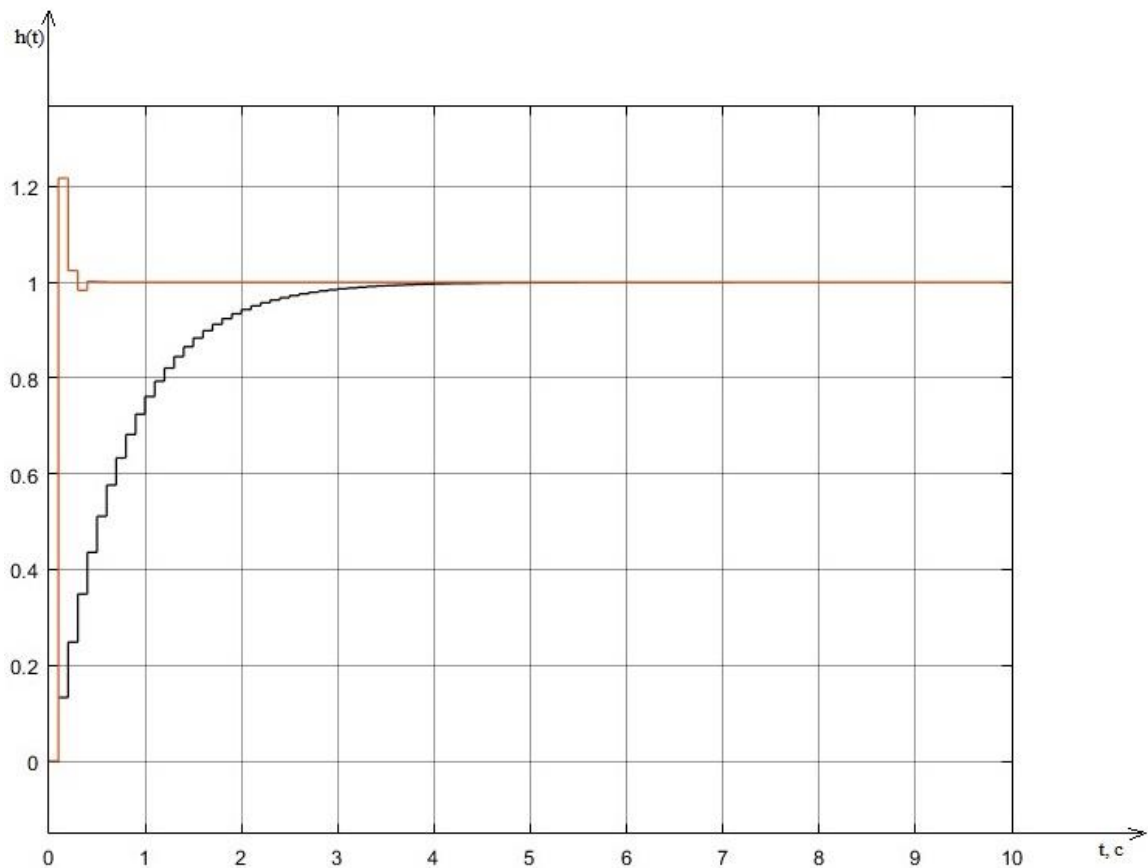


Рисунок 7.11 - Графік порівнянь перехідних процесів ПД-регулятора

Отже, згідно рисунку 7.11 видно, що збільшений коефіцієнт підсилення на 0.5 є колосальним впливом на перехідний процес регулювання ПД-регулятором й призводить до неправильної роботи регулятора. Коливання коефіцієнту підсилення у 0.5 одиниці призводить до перерегулювання близько 22% й робить даний ПД-регулятор не придатним для регулювання.

У порівнянні грубості обох регуляторів, ПД й заснованим на виборі бажаних функцій, ПД регулятор є більш грубим. Регулювання ПД-регулятора стає не можливим, якщо коливання коефіцієнту підсилення становить 0.5, а регулятора заснованого на виборі бажаних функцій вже при коливанні 0.1. Тобто

дослідження показує, що ПІД-регулятор є у 5 разів грубішим за регулятор заснований на виборі бажаних функцій.

На основі отриманих даних з досліджень можемо стверджувати, що ПІД-регулятор необхідно обирати, коли потрібна менша точність та присутні серйозні коливання коефіцієнта підсилення передавальної функції. У той час як регулятор заснований на виборі бажаних функцій обирають для більш точних систем та коли коливання коефіцієнта підсилення передавальної функції системи є дуже незначним, до 0.1.

7.4 Безпосередня декомпозиція

Формула безпосередньої декомпозиції для цифрового регулятора (7.15):

$$D(z) = \frac{2.17127z^3 - 2.30589z^2 + 0.14367z - 0.00243}{z^3 - 1.63271z^2 + 0.75786z - 0.12515} =$$

$$= \frac{2.17127 - 2.30589z^{-1} + 0.14367z^{-2} - 0.00243z^{-3}}{1 - 1.63271z^{-1} + 0.75786z^{-2} - 0.12515z^{-3}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} \quad (7.18)$$

$$E_2(z) = (2.17127 - 2.30589z^{-1} + 0.14367z^{-2} - 0.00243z^{-3}) \times A(z) \quad (7.19)$$

$$A(z) = \frac{1}{1} E_1(z) - \frac{1}{1} (-2.30589z^{-1} + 0.14367z^{-2} - 0.00243z^{-3}) \times A(z) =$$

$$= E_1(z) + 2.30589z^{-1} \times A(z) - 0.14367z^{-2} \times A(z) + 0.00243z^{-3} \times A(z) \quad (7.20)$$

Схема з реалізацією цифрового регулятора, реалізована у MATLAB/Simulink методом безпосередньої декомпозиції представлена на рисунку 7.12.

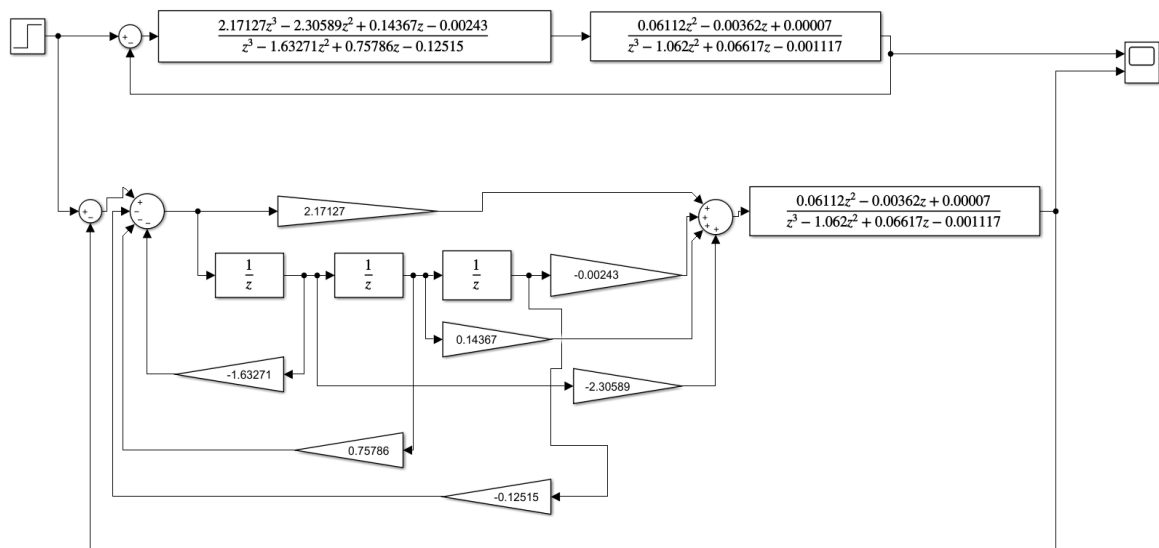


Рисунок 7.12 - Модель цифрової системи з цифровим регулятором, який реалізовано методом безпосередньої декомпозиції

На основі проведених розрахунків, синтезу регуляторів й дослідження регуляторів на грубість для автоматизованої цифрової системи керування самохідним георадаром обираємо ПД-регулятор, бо він є більш стійким до коливань коефіцієнту підсилення.

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті розроблено автоматизовану систему керування самохідним георадаром, яка забезпечила нову функцію георадара, а саме автоматичне позиціонування у зоні проведення досліджень.

Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи керування самохідним георадаром. Розроблено математичну модель цифрової системи та перевірено її на якість та стійкість.

В дипломному проєкті виконано синтез декількох цифрових регуляторів: за вибором бажаних передавальних функцій та ПДД законами регулювання. Проведено детальне дослідження цих регуляторів на грубість. За проведеними розрахунками й дослідженнями було обрано для даної системи ПДД-регулятор, який забезпечує цифровій системі грубість до 5 разів більшу, ніж міг забезпечити регулятор обраний за вибором бажаних функцій.

У проєкті розроблена реалізація цифрового регулятора у вигляді програми контролера за методом безпосередньої декомпозиції.

					1A62.090BAK.005 ПЗ	Лист
						65
Зм.	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Принцип работы и использования георадара URL: <http://redut-security.ru/english-printsip-raboty-i-ispolzovanie-geor>
2. Приборы для поиска и диагностики подземных инженерных коммуникаций Третий глаз часть 2 URL: <https://os1.ru/article/7919-pribory-dlya-poiska-i-diagnostiki-podzemnyh-injenernyh-kommunikatsiy-trety-glaz-ch-2>
3. Георадар. Принцип действия URL: http://georadar-pro.ru/georadar_pro_0001.html
4. Георадар VIY3-070 URL: <https://www.ukrgeo.com.ua/products/poshuk-pidzemnyhkomunikacii/georadary-prylady-diagnostyky/georadary/georadar-viy3-070.html> .
5. Георадар URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D0%80> .
6. Виды георадаров URL: https://studbooks.net/1789452/geografiya/vidy_georadarov
7. О георадиолокации URL: http://library.voenmeh.ru/jirbis2/files/materials/ifour/book2/book_on_main_page/12.1.1.htm
8. Георадар ОКО-3 с антенным блоком АБ0150М3 для поиска подземных ходов URL: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=7098&tbl=07.01.02.&p=1>
9. РД-400 - радар-детектор для поиска живых людей под завалами URL: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=7095&tbl=07.01.02.&p=1>
10. Обнаружитель подповерхностных аномалий "NR-1700G" URL: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=5051&tbl=07.01.02.&p=1>

11. Функціональна схема URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0

12. Электродвигатель постоянного тока 24v450w с редуктором URL: http://www.e-bike.com.ua/motor_-kolesa-i-elektrodivigateli/elektrodivigateli-dlya-elektrotransporta?product_id=2102

13. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підруч. / Н.Б. Репнікова. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с.

14. Определение параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения по каталожным данным URL: https://studme.org/90432/tehnika/opredelenie_parametrov_dvigatelya_postoyan_nogo_toka_nezavisimogo_vozbuzhdeniya_katalozhnym_dannym